

Gärprodukte aus Biogasanlagen im pflanzenbaulichen Stoffkreislauf

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

doctor rerum agriculturalarum
(Dr. rer. agr.)

eingereicht an der

Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät
der Humboldt-Universität zu Berlin

von

Dipl.-Agr. Biol. Verena Wragge

Präsident

der Humboldt-Universität zu Berlin

Prof. Dr. Jan-Hendrik Olbertz

Dekan der

Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät

Prof. Dr. Dr. h.c. Frank Ellmer

Gutachter:

1. Prof. Dr. Dr. h.c. Frank Ellmer

2. Prof. Dr. Christoph Engels

3. Dr. Wilfried Zorn

Tag der mündlichen Prüfung:

18.03.2013

INHALTSVERZEICHNIS

Verzeichnis der Abbildungen	IV
Verzeichnis der Tabellen	VII
Abkürzungsverzeichnis	X
Zusammenfassung	XII
Abstract	XIII
1 Einleitung und Zielsetzung	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Fragestellungen und Zielsetzungen der Arbeit	2
1.3 Hypothese	3
2 Stand der Forschung	4
2.1 Entwicklung der Biogasproduktion	4
2.2 Grundprinzip der Biogasproduktion	5
2.3 Stoffliche Eigenschaften von Gärprodukten	6
2.3.1 Allgemeine Eigenschaften und wertgebende Inhaltsstoffe	6
2.3.2 Wertmindernde Inhaltsstoffe	9
2.4 Rechtliche Regelungen zum Einsatz von Gärprodukten als Dünger	10
2.4.1 Düngerechtliche Regelungen	11
2.4.2 Regelungen für Gärprodukte aus Bioabfällen und tierischen Nebenprodukten	12
2.5 Stoffkreisläufe und Wirkungen von Kohlenstoff und der Pflanzennährelemente Stickstoff, Phosphor und Kalium	13
2.5.1 Kohlenstoff	14
2.5.2 Stickstoff	17
2.5.3 Phosphor	21
2.5.4 Kalium	24
2.6 Wirkungen von Gärprodukten auf den Boden	25
2.6.1 Pflanzennährelementgehalte und pH-Wert des Bodens	26
2.6.2 Kohlenstoffhaushalt des Bodens und bodenmikrobiologische Parameter	27
2.6.3 Bodenmakrofauna	30
2.7 Wirkungen von Gärprodukten auf Pflanzen	32
2.7.1 Wachstum und N-Versorgungsstatus	32
2.7.2 Erträge verschiedener Kulturpflanzen	34

2.7.3	Qualität der Ernteprodukte	39
3	Material und Methoden.....	40
3.1	Versuchsstandorte	40
3.1.1	Boden.....	40
3.1.2	Klima und Witterung in den Versuchsjahren	41
3.2	Biogasanlagen und Gärprodukte.....	44
3.2.1	Biogasanlagen	44
3.2.2	Gärprodukte	45
3.3	Anlage und Beprobung der Parzellen- und Praxisfeldversuche	46
3.3.1	Parzellenfeldversuche.....	46
3.3.2	Praxisversuche.....	50
3.4	Untersuchungen am Boden.....	51
3.4.1	Bodenchemie	51
3.4.2	Bodenbiologie	53
3.5	Untersuchungen an Pflanzen	59
3.5.1	Untersuchungen im Pflanzenbestand	59
3.5.2	Untersuchungen zur äußeren Qualität der Ernteprodukte und deren Inhaltsstoffe.....	60
3.6	Untersuchungen an Gärprodukten	60
3.7	Datenaufbereitung	61
3.7.1	Berechnung der Kennzahlen zur Düngewirksamkeit der Gärprodukte	61
3.7.2	Statistische Datenaufbereitung	62
4	Ergebnisse	63
4.1	Wirkungen der Gärproduktdüngung auf den Boden.....	63
4.1.1	Bodenchemische Parameter.....	63
4.1.2	Mikrobielle Aktivität	69
4.1.3	Abundanz, Biomasse und Artenverteilung von Regenwürmern.....	75
4.2	Wirkungen der Gärproduktdüngung auf Kulturpflanzen	78
4.2.1	Wachstum und N-Versorgungsstatus von Sommerweizen und Silomais	78
4.2.2	Erträge und Stickstoffentzüge von Sommerweizen, Ölerrettich und Silomais sowie Qualität des Sommerweizenkorns	87
4.2.3	Vergleich der N-Düngewirkungen der Gärprodukte in den beiden Versuchs- jahren und für die beiden Kulturarten.....	104
4.2.4	Erträge von Silomais und GPS-Roggen in Praxisfeldversuchen	105

5 Diskussion.....	108
5.1 Wirkungen der Gärproduktdüngung auf den Boden.....	108
5.1.1 Bodenchemische Parameter	109
5.1.2 Mikrobielle Aktivität	112
5.1.3 Abundanz, Biomasse und Artenverteilung von Regenwürmern.....	114
5.2 Wirkungen der Gärproduktdüngung auf Kulturpflanzen	118
5.2.1 Wachstum und N-Versorgungsstatus von Silomais und Sommerweizen	118
5.2.2 Erträge und Qualität der Ernteprodukte	121
5.2.3 Nährstoffbilanzen	125
6 Fazit	127
7 Anwendungsempfehlungen.....	129
Literaturverzeichnis	130
Anhang	143
Danksagungen.....	152
Erklärung.....	153

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

Abbildung 2-1: Schema der Biogasproduktion (nach FRIEHE <i>et al.</i> , 2010)	5
Abbildung 2-2: Schema des landwirtschaftlichen Kohlenstoffkreislaufs (eigene Darstellung)	15
Abbildung 2-3: Schema des landwirtschaftlichen Stickstoffkreislaufs (eigene Darstellung) ...	18
Abbildung 3-1: Mittlere Monatstemperaturen in Berlin-Dahlem in den Jahren 2006 und 2007 im Vergleich zum langjährigen Mittel (1971-2000)	42
Abbildung 3-2: Mittlere Monatsniederschlagshöhen in Berlin-Dahlem in den Jahren 2006 und 2007 im Vergleich zum langjährigen Mittel (1971-2000)	42
Abbildung 3-3: Anlageplan der Parzellenfeldversuche (zweifaktorielle Spaltanlage)	46
Abbildung 3-4: Sommerweizenbestand im Jahr 2006 a) Ende Mai und b) Parzelle zur Ernte am 01.08.2006	47
Abbildung 3-5: Anlage der Praxisfeldversuche als Praxisgroßversuche bestehend aus vier Düngestreifen mit jeweils fünf Beprobungsquadraten	50
Abbildung 3-6: Bodenatmungsmessung im Sommerweizenfeld a) Bodenatmungsmesssystem, zusammengesetzt aus der Messeinheit (EGM-4, rechts), der Bodenatmungskammer (SRC-1, links) sowie dem Bodenthermometer (Mitte) b) Anordnung der Messpunkte in der Parzelle	54
Abbildung 3-7: Aufbau des Modellversuchs zur Messung der CO ₂ - sowie der CH ₄ -Freisetzung von unterschiedlich gedüngtem Boden a) Testboden in perforiertem Kunststoffrohr b) befülltes Kunststoffrohr im zylindrischen Behälter c) neun verschlossene Versuchsgefäße in isoliertem Raum angeordnet	55
Abbildung 3-8: Untersuchungen der Wirkung von Gärprodukten auf Regenwürmer im Sommerweizenfeld a) Handauslese der Bodenproben und b) Probenahmestelle mit anschließender Formalinextraktion	57
Abbildung 3-9: Vermeidungstest mit der Regenwurmart <i>Eisenia fetida</i> mit Prüf- und Kontrollboden a) Trennung der Versuchshälften nach 48 h Versuchszeit und b) Auszählung der Regenwürmer im Prüf- und Kontrollboden	58
Abbildung 4-1: Zeitlicher Verlauf der Bodenatmung unter Sommerweizen nach Gärprodukt- bzw. Mineraldüngung (ca. 150 kg ha ⁻¹ N) im Jahr 2006; Grafik: Werte in Prozent vom Mittelwert der Kontrollvarianten, Tabelle: gemessene Bodenatmung [g CO ₂ m ⁻² h ⁻¹]	70

Abbildung 4-2: Zeitlicher Verlauf der Bodenatmung unter Sommerweizen nach Gärprodukt- bzw. Mineraldüngung (ca. 150 kg ha ⁻¹ N) im Jahr 2007; Grafik: Werte in Prozent vom Mittelwert der Kontrollvarianten, Tabelle: gemessene Bodenatmung [g CO ₂ m ⁻² h ⁻¹].....	71
Abbildung 4-3: Zeitlicher Verlauf der Bodenatmung unter Silomais nach Gärprodukt- bzw. Mineraldüngung (ca. 150 kg ha ⁻¹ N) im Jahr 2006; Grafik: Werte in Prozent vom Mittelwert der Kontrollvarianten, Tabelle: gemessene Bodenatmung [g CO ₂ m ⁻² h ⁻¹]	72
Abbildung 4-4: Zeitlicher Verlauf der Bodenatmung unter Silomais nach Gärprodukt- bzw. Mineraldüngung (ca. 150 kg ha ⁻¹ N) im Jahr 2007; Grafik: Werte in Prozent vom Mittelwert der Kontrollvarianten, Tabelle: gemessene Bodenatmung [g CO ₂ m ⁻² h ⁻¹]	73
Abbildung 4-5: a) CO ₂ -C-Abgabe (kumuliert) bzw. b) CH ₄ -Abgabe (kumuliert) eines Boden-Gärprodukt-Gemisches im Vergleich zu einem Boden-Mineraldünger-Gemisch und einer unbehandelten Bodenprobe über 19 Tage im Bodensäulen-Modellversuch; n = 3.....	74
Abbildung 4-6: Artenverteilung der Regenwürmer in Abhängigkeit von der N-Aufwandmenge aus Gärprodukt A im Feldversuch mit Sommerweizen im Jahr 2007.....	77
Abbildung 4-7: Zeitlicher Verlauf des Sommerweizenwachstums anhand der Pflanzenlänge a) im Jahr 2006 und b) im Jahr 2007 sowie anhand des Blattflächenindex c) im Jahr 2006 und d) im Jahr 2007 in Abhängigkeit von der Düngerart im Vergleich zur Kontrolle.....	80
Abbildung 4-8: Zeitlicher Verlauf der Blattgrünwerte des Sommerweizens relativ zur ungedüngten Kontrolle (Mittelwert) a) im Jahr 2006 und b) im Jahr 2007 in Abhängigkeit von der Düngung	82
Abbildung 4-9: Zeitlicher Verlauf des Silomaiswachstums anhand der Pflanzenlänge a) im Jahr 2006 und b) im Jahr 2007 sowie anhand des Blattflächenindex c) im Jahr 2006 und d) im Jahr 2007 in Abhängigkeit von der Düngerart im Vergleich zur Kontrolle.....	84
Abbildung 4-10: Zeitlicher Verlauf der Blattgrünwerte des Silomaises relativ zur ungedüngten Kontrolle (Mittelwert) a) im Jahr 2006 und b) im Jahr 2007 in Abhängigkeit von der Düngung	86
Abbildung 4-11: Ergebnisse der Siebsortierung des Sommerweizenkorns im Jahr 2006 in Abhängigkeit von der Düngung im Vergleich zur Kontrolle	89
Abbildung 4-12: Rohproteingehalt des Sommerweizenkorns im Jahr 2006 in Abhängigkeit von der Düngung	90

Abbildung 4-13: Ganzpflanzenertrag der Zwischenfrucht Ölrettich (TM) im Jahr 2006 in Abhängigkeit von der Düngung der Vorfrucht im Vergleich zur Kontrolle	91
Abbildung 4-14: Stickstoffentzüge durch Sommerweizen (Korn und Stroh) sowie die Zwischenfrucht Ölrettich (Ganzpflanze) im Jahr 2006 in Abhängigkeit von der Düngung im Vergleich zur Kontrolle	92
Abbildung 4-15: Ergebnisse der Siebsortierung des Sommerweizenkorns im Jahr 2007 in Abhängigkeit von der Düngung im Vergleich zur Kontrolle	96
Abbildung 4-16: Rohproteingehalt des Sommerweizens im Jahr 2007 in Abhängigkeit von der Düngerart und der Aufwandmenge	97
Abbildung 4-17: Stickstoffentzüge des Sommerweizens (Korn und Stroh) im Jahr 2007 in Abhängigkeit von der Düngerart und der N-Aufwandmenge im Vergleich zur Kontrolle	98
Abbildung 4-18: Silomaisertrag (TM) im Jahr 2006 in Abhängigkeit von der Düngerart im Vergleich zur Kontrolle.....	99
Abbildung 4-19: Stickstoffentzug durch Silomais im Jahr 2006 in Abhängigkeit von der Düngung im Vergleich zur Kontrolle	100
Abbildung 4-20: Silomaisertrag (TM) im Jahr 2007 in Abhängigkeit von der Düngerart und der N-Aufwandmenge.....	101
Abbildung 4-21: Stickstoffentzüge durch Silomais im Jahr 2007 in Abhängigkeit von der Düngerart und der N-Aufwandmenge im Vergleich zur Kontrolle.....	103

VERZEICHNIS DER TABELLEN

Tabelle 2-1:	Literaturübersicht zur stofflichen Zusammensetzung von Gärprodukten mit Angabe von Minimum, Maximum sowie arithmetischem Mittelwert (fett).	7
Tabelle 3-1:	Korngrößenverteilungen des Oberbodens an den Standorten Berlin, Dolgeln und Püggen.....	40
Tabelle 3-2:	Chemische Eigenschaften des Oberbodens vor Versuchsbeginn im Frühjahr 2006 an den Standorten Berlin, Dolgeln und Püggen	41
Tabelle 3-3:	Tagesmittelwerte für Temperatur, relative Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit sowie Tagessumme der Globalstrahlung zu den Ausbringungsterminen der Gärprodukte in den Parzellenfeldversuchen in den Jahren 2006 und 2007	43
Tabelle 3-4:	Verwendete Substrate sowie Prozess- und Anlagenparameter der Biogasanlagen A, B und C	44
Tabelle 3-5:	Chemische Eigenschaften der Gärprodukte A, B und C in den Jahren 2006 und 2007	45
Tabelle 3-6:	Ausgebrachte Nährelementmengen (N, P, K) der vier Dünger in den Versuchsjahren 2006 und 2007 (für beide Schläge gleich).....	48
Tabelle 3-7:	Verschiedene Parameter und Zeitpunkte durchgeführter Maßnahmen in den Parzellenfeldversuchen in Berlin-Dahlem	49
Tabelle 3-8:	Ausgebrachte Nährelementmengen (N, P, K) an den beiden Praxisversuchsstandorten in den Jahren 2006 und 2007 (für Winterroggen und Silomais)	50
Tabelle 3-9:	Verschiedene Parameter und Zeitpunkte agrotechnischer Maßnahmen der drei Praxisversuche in Dolgeln und Püggen in den Jahren 2006 und 2007	51
Tabelle 3-10:	Angewandte Methoden zur Analyse bodenchemischer und –physikalischer Parameter	53
Tabelle 3-11:	Merkmale der beiden Vermeidungstests hinsichtlich Düngermenge und Bodenfeuchte (nach GRUNER, 2008).....	58
Tabelle 3-12:	Verwendete Methoden zur Untersuchung der Ernteprodukte hinsichtlich der inhaltlichen Zusammensetzung.....	60
Tabelle 3-13:	Angewandte Methoden zur Untersuchung der Gärprodukte auf verschiedene physikalische und chemische Parameter	61

Tabelle 4-1:	Nährstoffgehalte und pH-Werte ausgewählter Varianten der Parzellenfeldversuche in Abhängigkeit von der Düngerart, der Aufwandmenge sowie des Probenahmezeitraumes	66
Tabelle 4-2:	Abundanz, Altersstufe und Masse der Regenwürmer in Abhängigkeit von der N-Stufe aus Gärprodukt A im Feldversuch mit Sommerweizen im Jahr 2007	75
Tabelle 4-3:	Durchschnittliche Anzahl von Würmern (<i>E. fetida</i>) im Kontroll- bzw. Prüfboden im Rahmen von Vermeidungstests sowie berechnete Vermeidung des Prüfbodens (ausgehend von einer 50:50-Verteilung); n = 5	78
Tabelle 4-4:	Kornertrag (86 % TS), Strohertrag (TM) sowie Ertragsstruktur (Bestandesdichte, Kornzahl je Ähre und Tausendkornmasse (TKM)) von Sommerweizen im Jahr 2006 in Abhängigkeit von der Düngerart	88
Tabelle 4-5:	Kornertrag (86 % TS), Strohertrag (TM) sowie Ertragsstruktur (Bestandesdichte, Körner je Ähre und Tausendkornmasse (TKM)) von Sommerweizen im Jahr 2007 in Abhängigkeit von der Düngerart und der N-Aufwandmenge im Vergleich zur Kontrolle	93
Tabelle 4-6:	N-Düngewirkung der Gärprodukte (100 kg ha ⁻¹ N) im Vergleich zu N-Mineraldünger beim Sommerweizen im Jahr 2007 nach verschiedenen Methoden berechnet	94
Tabelle 4-7:	N-Düngewirkung der Gärprodukte (100 kg ha ⁻¹ N) im Vergleich zu N-Mineraldünger beim Silomais im Jahr 2007 nach verschiedenen Methoden berechnet	102
Tabelle 4-8:	Vergleich der N-Düngewirkung der Gärprodukte anhand der relativen Erträge nach Abzug der Erträge der jeweiligen Kontrollvarianten bei einer N-Aufwandmenge von 150 kg ha ⁻¹ in den Versuchsjahren 2006 und 2007 sowie zwischen den Kulturarten Sommerweizen (Kornertrag bei 86 % TM) und Silomais (TM-Ertrag)	104
Tabelle 4-9:	Silomaiserträge (TM) und GPS-Roggenerträge (TM) im Praxisversuch am Standort Dolgeln in den Jahren 2006 und 2007 in Abhängigkeit von der N-Aufwandmenge des hofeigenen Gärproduktes (GP A)	105
Tabelle 4-10:	Silomaiserträge (TM) im Praxisversuch am Standort Püggen in den Jahren 2006 und 2007 in Abhängigkeit von der N-Aufwandmenge des hofeigenen Gärproduktes (GP B)	106
Tabelle 6-1:	Signifikante Wirkungen der Faktoren Dünger und Aufwandmenge sowie deren Wechselwirkungen im F-Test bzw. Unterschiede der Dünger in der Aufwandmenge 150 kg ha ⁻¹ N zur Kontrolle im t-Test der bodenchemischen Parameter ($\alpha = 0,05$; x = signifikante Wirkung)	143

Tabelle 6-2:	Gesamtkohlenstoffgehalte (C_{ges}) und Gehalte an heißwasserlöslichen Kohlenstoff (C_{hwl}) des Bodens in den Parzellenfeldversuchen in Abhängigkeit der Düngerart, der Aufwandmenge und des Probenahmezeitpunktes	144
Tabelle 6-3:	Gesamtstickstoffgehalte (N_{ges}) und Gehalte an heißwasserlöslichen Stickstoff (N_{hwl}) des Bodens in den Parzellenfeldversuchen in Abhängigkeit der Düngerart, der Aufwandmenge und des Probenahmezeitpunktes.....	144
Tabelle 6-4:	Gehalte an mineralischem Stickstoff (N_{min}) in 0-30 und 30-60 cm Bodentiefe in den Parzellenfeldversuchen in Abhängigkeit der Düngerart, der Aufwandmenge und des Probenahmezeitpunktes.....	145
Tabelle 6-5:	Lösliche Phosphor- (P_{DL}) und Kaliumgehalte (K_{DL}) des Bodens in den Parzellenfeldversuchen in Abhängigkeit der Düngerart, der Aufwandmenge und des Probenahmezeitpunktes.....	147
Tabelle 6-6:	pH-Werte des Bodens in den Parzellenfeldversuchen in Abhängigkeit der Düngerart, der Aufwandmenge und des Probenahmezeitpunktes.....	148
Tabelle 6-7:	Nährstoffbilanz für die Nährstoffe N, P und K im Jahr 2006 für Sommerweizen und Ölrettich	149
Tabelle 6-8:	Nährstoffbilanz für die Nährstoffe N, P und K im Jahr 2007 für Sommerweizen	150
Tabelle 6-9:	Nährstoffbilanz für die Nährstoffe N, P und K im Jahr 2006 für Silomais	151
Tabelle 6-10:	Nährstoffbilanz für die Nährstoffe N, P und K im Jahr 2007 für Silomais	151

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ABI.	Amtsblatt
ADF	Acid detergent fibre
ADL	Acid detergent lignin
ADP	Adenosindiphosphat
A _h -Horizont	Mineralischer Oberboden mit Anreicherung von Humus
AHL	Ammonitrat-Harnstofflösung
ATP	Adenosintriphosphat
BBCH	Skala zur Beschreibung der Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen
BFI	Blattflächenindex
BGBI	Bundesgesetzblatt
BHKW	Blockheizkraftwerk
BioAbfV	Bioabfallverordnung
C ₃ -Pflanze	Pflanzen, welche den Calvin-Zyklus zum Einbau des aufgenommenen Kohlendioxids in C-Körper nutzen
C ₄ -Pflanze	Pflanzen, welche den C ₄ -Dicarbonsäureweg zum Einbau des aufgenommenen Kohlendioxids in C-Körper nutzen
C _{ges}	Gesamtkohlenstoff
C _{hwl}	Kohlenstoff heißwasserlöslich
C _{mic}	Kohlenstoff aus mikrobieller Biomasse
C _{org}	Organisch gebundener Kohlenstoff
DAP	Di-Ammoniumphosphat
DNA	Desoxiribonucleic acid (Desoxiribonukleinsäure)
DüG	Düngegesetz
DüMV	Düngemittelverordnung
DüV	Düngeverordnung
EEG	Gesetz zum Vorrang Erneuerbarer Energien (kurz: Erneuerbare Energien Gesetz)
FACE	Free-air carbon dioxide enrichment
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
FM	Frischmasse
GP	Gärprodukt
GP A	Gärprodukt aus der Biogasanlage in Dolgeln (Monofermentation von Energiepflanzen)
GP B	Gärprodukt aus der Biogasanlage in Püggen (Monofermentation von Energiepflanzen, biologischer Anbau)
GP C	Gärprodukt aus der Biogasanlage in Groß Kreutz (Kofermentation von Gülle und Mais)
GPS	Ganzpflanzensilage
GWh	Gigawattstunden
K _{AL}	Kalium aufgeschlossen nach der Ammonium-Lactat-Methode
KAS	Kalkammonsalpeter

K _{DL}	Kalium aufgeschlossen nach der Doppellactat-Methode
K _{ges}	Gesamtkalium
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
KW	Kalenderwoche
kW _{el}	Kilowatt elektrisch
MAP	Mono-Ammoniumphosphat
MDÄ	Mineraldüngeräquivalent
MW	Mittelwert
NawaRo	Nachwachsende Rohstoffe
NDF	Soluble and neutral detergent fibre
NDS	Neutral detergent soluble
N _{ges}	Gesamtstickstoff
N _{mic}	Stickstoff aus mikrobieller Biomasse
N _{min}	Mineralisch gebundener Stickstoff
N _{org}	Organisch gebundener Stickstoff
OBS	Organische Bodensubstanz
OBS _{ums}	Umsetzbare organische Bodensubstanz
oTS	Organische Trockensubstanz
P _{AL}	Phosphor aufgeschlossen nach der Ammonium-Lactat-Methode
P _{ges}	Gesamtphosphor
P _{DL}	Phosphor aufgeschlossen nach der Doppellactat-Methode
P _{Olsen}	Phosphor (verfügbar) aufgeschlossen nach einer Methode von Olsen
ppb	Parts per billion
ppm	Parts per million
RNA	Ribonucleic acid (Ribonukleinsäure)
S _{ges}	Gesamtschwefel
TKM	Tausendkornmasse
TM	Trockenmasse
TMV	Tabak-Mosaik-Virus
TS	Trockensubstanz
TOC	Total organic carbon (entspricht C _{org})
Vol-%	Volumenprozent

ZUSAMMENFASSUNG

Biogas im Rahmen einer nachhaltigen Landwirtschaft zu erzeugen bedeutet u. a., die anfallenden Gärprodukte als Dünger zu verwenden, um die Verluste im Nährstoffkreislauf zu minimieren. Die vorliegende Arbeit geht der Frage nach, welche Wirkungen Gärprodukte aus der Biogasproduktion bei der Verwendung als Dünger auf Boden und Pflanzen haben.

Die Ergebnisse von Parzellenfeld- und Praxisversuchen, in denen Gärprodukte aus der Mono- und Kofermentation von Energiepflanzen im Vergleich zu N-Mineraldünger untersucht wurden, werden vorgestellt und diskutiert. Zur Beurteilung der Wirkungen auf den Boden wurden bodenchemische und bodenbiologische Parameter herangezogen sowie die Abbaustabilität der organischen Substanz der Gärprodukte gemessen. Zur Untersuchung der Wirkungen auf die Pflanzen wurden verschiedene Wachstums-, Entwicklungs-, Ertrags- und Qualitätsparameter erfasst und ausgewertet.

Die Gärprodukte zeichnen sich durch relativ hohe Ammoniumgehalte sowie durch hohe pH-Werte aus. Das Pflanzenwachstum und die Erträge werden durch die Düngung mit Gärprodukten gesteigert, wobei die Wirkung trotz der hohen Ammoniumgehalte deutlich hinter denen des N-Mineraldüngers zurückbleibt. Die berechneten Nährstoffbilanzen weisen auf deutliche Unterschiede zwischen den untersuchten Gärprodukten und Kulturarten, aber auch zwischen den beiden Versuchsjahren hin. Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass durch die Verwendung von Gärprodukten als Dünger wichtige Pflanzennährstoffe rezykliert werden können, wodurch der Einsatz von Mineraldüngern reduziert werden kann. Hinsichtlich der Wirkungen von Gärprodukten auf den Boden zeichnen die umfangreichen Analysen ein differenziertes Bild. Die mikrobiologischen Umsetzungsprozesse im Boden werden insbesondere in den ersten Tagen nach der Ausbringung gefördert. Weiterer Forschungsbedarf wird insbesondere hinsichtlich der Wirkungen auf die Bodenmakrofauna aufgezeigt.

ABSTRACT

Producing biogas in a sustainable agricultural system means using digestates as fertilizers, in order to minimize leaks in nutrient cycles. The aim of this work is to investigate effects on soil and plants after field application of digestates. In this respect, results from plot- and practical field experiments are analyzed to compare digestates from mono- and from co-fermentation of energy crops in comparison to mineral N-fertilizer.

Soil chemical and biological effects were assessed on the basis of selected parameters, one of which was the stability of the organic matter applied. Effects on crops have been evaluated by measuring growth, development, yields, and quality of the crops.

The digestates have been analyzed and showed especially high amounts of ammonium and a high pH-value. Plant growth and yields increased as a result of fertilization. However, despite high amounts of ammonia present in digestates, fertilizing effects have been much lower compared to mineral N-fertilization. The calculated nutrient balances showed obvious differences between the digestates analyzed, crops, and also between the two experimental years. Generally, the results demonstrate that nutrients can be recycled by using digestates as fertilizers and thus the use of mineral fertilizers can be reduced. The extensive soil analyses presented in this work show diverse results. Microbial metabolic processes in the soil are increased especially during the first few days after digestate application. More research is needed with respect to effects on macro fauna.

1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

1.1 Einleitung

Die Produktion von Biogas hat sich neben der Erzeugung von Nahrungsmitteln für die Landwirtschaft in den vergangenen Jahren zu einem neuen Standbein entwickelt.

Die globale atmosphärische Kohlendioxid-Konzentration ist durch die Nutzung fossiler Energien in den vergangenen Jahrzehnten deutlich angestiegen, was zur Verstärkung des anthropogenen Treibhauseffekts und somit zur globalen Veränderung des Klimas beigetragen hat. Diese Entwicklungen drängen Politiker und Entscheidungsträger auf der ganzen Welt, Regelungen zur Minderung von Treibhausgasemissionen zu finden. Das Integrierte Energie- und Klimaprogramm der Bundesregierung verfolgt das Ziel, die Treibhausgasemissionen in Deutschland bis zum Jahr 2020 um 40 % unter das Niveau von 1990 zu reduzieren (BMWi & BMU, 2007). Dies soll unter anderem durch eine Reduktion des Einsatzes fossiler Energieträger zur Strom- und Wärmeproduktion erreicht werden. Dafür soll der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromproduktion von derzeit 13 auf mindestens 25 % im Jahr 2020 steigen. Als Instrument zur Förderung erneuerbarer Energien wurde im Jahr 2000 das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)¹ verabschiedet, welches unter anderem auch die Biogastechnologie fördert. Dadurch wurden Marktanreize geschaffen, die sich in der Anzahl der errichteten Biogasanlagen widerspiegeln: In den letzten zehn Jahren stieg diese um mehr als das Fünffache auf ca. 7.215 im Jahr 2011 (FACHVERBAND BIOGAS E. V., 2012).

Mit zunehmender Anlagenzahl stieg neben dem Hauptprodukt Biogas auch die Menge des beim Biogasprozess anfallenden Gärprodukts, oft auch als Gärrest, Gärrückstand oder Biogasgülle bezeichnet, an. Da während des Fermentationsprozesses überwiegend Methan und Kohlendioxid den Fermenter verlassen, enthalten die Gärprodukte noch alle wichtigen Pflanzennährelemente, welche durch die Substrate in den Prozess eingebracht wurden.

In einem natürlichen Ökosystem nehmen lebende Organismen direkt oder indirekt Nährelemente aus dem Boden auf und geben diese in Form von Ausscheidungen bzw. nach ihrem Absterben an den Boden zurück. Anders ist dies in Agrarökosystemen, in denen Pflanzen zu Nutzw- und Nahrungszwecken angebaut werden und die Reststoffe als Gülle, Kompost, Klärschlamm oder Gärprodukte räumlich getrennt anfallen. Die Rückführung der Nährelemente in den Kreislauf erfolgt unvollständig, da zum einen bei der Lagerung und bei der Ausbringung der Dünger

¹ Gesetz zum Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG) vom 25. Oktober 2008. BGBl 1, S. 2074

Verluste entstehen. Zum anderen werden Klärschlämme nur zu etwa 44 % landwirtschaftlich und landschaftsbaulich genutzt (DESTATIS, 2012). In der konventionellen und integrierten Landwirtschaft können die dadurch fehlenden Nährelemente durch den Einsatz mineralischer Dünger ausgeglichen werden. Da jedoch die Produktion von Mineraldüngern mit hohem Energieaufwand verbunden ist, sollte eine Rückführung von Nährelementen in den landwirtschaftlichen Kreislauf, wo dies möglich ist, aus ökonomischen und ökologischen Gründen realisiert werden.

Auch durch die Nutzung von Gärprodukten als Dünger, z. B. auf den zum Anbau von Biogas-substrat genutzten Flächen, kann der Nährstoffkreislauf annähernd geschlossen und die mineralische Düngung reduziert werden.

Da Dünger zum einen zur Erhaltung bzw. Steigerung der Bodenfruchtbarkeit beitragen und zum anderen die angebauten Kulturpflanzen optimal ernähren sollen, ohne dabei Umweltbelastungen zu verursachen (SCHILLING, 2000), ist es wichtig, die Eigenschaften der verschiedenen Gärprodukte und die damit verbundenen Wirkungen auf Boden und Pflanzen zu kennen.

1.2 Fragestellungen und Zielsetzungen der Arbeit

Häufig werden Gärprodukte bei der Berechnung von Düngergaben und bei der Ausbringung wie Gülle aus der Tierproduktion gehandhabt. Sie unterscheiden sich jedoch davon in ihrer stofflichen Zusammensetzung und somit auch in ihren Wirkungen auf Boden und Pflanzen. Diese wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersucht. Die wichtigsten Unterschiede der Gärprodukte zu Gülle aus der Tierproduktion sind höhere Anteile von Ammoniumstickstoff am Gesamtstickstoff, höhere pH-Werte und geringere Anteile an Trockensubstanz (TS) sowie organischer Trockensubstanz (oTS). Die Publikationen der vergangenen Jahre beschäftigten sich vor allem mit den Unterschieden zwischen frischer und fermentierter Gülle bezüglich Beschaffenheit und Düngewirkung. Wenig ist dagegen über die Eigenschaften von Gärprodukten aus der anaeroben Fermentation von Energiepflanzen bekannt. Seit der Novellierung des EEGs im Jahr 2004 wird der ausschließliche Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen als Substrat mit einem Bonus zusätzlich vergütet. Seither werden vermehrt Energiepflanzen in Biogasanlagen sowohl als Koferment zur Gülle als auch als einziges Substrat genutzt. Die Untersuchung der Gärprodukte aus der Monofermentation von Energiepflanzen bildet einen Schwerpunkt dieser Arbeit. Auch über die Wirkung von Gärprodukten auf die mikrobielle Aktivität des Bodens sowie auf die Bodenmakro- und Bodenmesofauna ist bisher wenig bekannt, weshalb Untersuchungen zu diesen Themen durchgeführt wurden.

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation werden folgende Fragestellungen im Detail untersucht:

1. Welche Wirkung hat die Düngung mit Gärprodukten aus der Mono- und Kofermentation von Energiepflanzen auf Gehalte und Verfügbarkeiten von Nährstoffen im Boden sowie auf den pH-Wert des Bodens?
2. Beeinflusst die Düngung mit Gärprodukten die mikrobielle Aktivität im Boden bzw. wie abbaustabil ist die organische Substanz der Gärprodukte?
3. Welche Wirkung hat die Düngung mit Gärprodukten auf die Bodenmakrofauna?
4. Welche Wirkung haben Gärprodukte auf Wachstum, Entwicklung, Erträge, Ertragsstruktur und Qualität bei verschiedenen Kulturpflanzen?
5. Ist die Zusammensetzung der Nährstoffe N, P und K in den Gärprodukten günstig für die Düngung von Kulturpflanzen?

1.3 Hypothese

Anhand der bisherigen Literatur können folgende Hypothesen abgeleitet werden:

Gärprodukte aus der Mono- und Kofermentation von Energiepflanzen haben keine negativen Effekte auf den Boden und fördern die mikrobielle Aktivität sowie die Bodenmakrofauna. Auf das Wachstum, die Entwicklung, die Erträge und die Qualität der Ernteprodukte von Kulturpflanzen hat der Einsatz von Gärprodukten als Dünger einen positiven Effekt, der jedoch bei gleicher N-Aufwandmenge geringer als der von Mineraldünger ist.

2 STAND DER FORSCHUNG

Im folgenden Kapitel sind die derzeit wichtigsten Erkenntnisse und Zusammenhänge in Bezug auf Entstehung, Zusammensetzung, Anwendung und Wirkung von Gärprodukten zusammengestellt. Daneben wird der Kenntnisstand zu Bedeutung und Wirkung von Kohlenstoff sowie der Hauptnährelemente Stickstoff, Phosphor und Kalium beschrieben.

2.1 Entwicklung der Biogasproduktion

Das Prinzip der anaeroben Vergärung ist schon lange bekannt: Bereits seit ca. 4.500 v. Chr. gab es in Städten eine Art von Hauskläranlagen, in denen sich die Schwerstoffe des Abwassers absetzen und ausfaulen konnten (ERHARD, 1954). Diese Abwasserentsorgung entwickelte sich im Laufe der Jahrhunderte zu einer ausgereiften Technik der anaeroben Abwasserbehandlung. Die Nützlichkeit des dabei entstehenden Faulgases wurde erst gegen Ende des 19. Jahrhunderts entdeckt (BISCHOFBERGER *et al.*, 2005).

Landwirtschaftliche Vergärungsanlagen werden nicht direkt zur Abfallbehandlung, sondern überwiegend mit dem Ziel der Energieproduktion betrieben. Da sie sich sowohl durch die Zielstellung der Anwendung als auch durch die eingesetzten Substrate grundlegend von den im kommunalen und industriellen Bereich eingesetzten Verfahren zur Abwasser- und Klärschlammbehandlung unterscheiden, muss ihre Entwicklung eigenständig betrachtet werden. Die ersten landwirtschaftlichen Biogasanlagen zur Vergärung von organischem Material wurden in Deutschland und Frankreich während des Zweiten Weltkriegs entwickelt. Bis 1950 wurden dann in Deutschland über 50 Biogasanlagen gebaut. Zu dieser Zeit spielte die Nutzung der Gärprodukte aufgrund der bestehenden Düngemittelknappheit bereits eine wichtige Rolle (BISCHOFBERGER *et al.*, 2005). Jedoch ging der Anlagenbau in der darauf folgenden Zeit aufgrund niedriger Heizöl- und Mineraldüngerpreise zurück. Erst mit der Ölkrise im Jahr 1973 wurde die Technik wieder interessant. Ab 1990 nahm die Anlagenzahl mit der Einführung gesetzlicher Regelungen zur Einspeisevergütung weiter zu. Diese Entwicklung verstärkte sich mit dem Inkrafttreten des Gesetzes für den Vorrang Erneuerbarer Energien (EEG) im Jahr 2000 sowie nach den Novellierungen in den Jahren 2004 und 2009 noch einmal rasant. Im Jahr 2006 machte die elektrische Energie aus Biogasanlagen mit 5.400 GWh einen Anteil von 0,9 % des Jahresstromverbrauchs in Deutschland aus (STAß *et al.*, 2007). Neben der Nutzung des Biogases zur Stromerzeugung durch Verbrennung ist mit fortschreitender technischer Entwicklung auch eine Nutzung als Kraftstoff sowie die Aufbereitung des Biogases auf Erdgasqualität mit anschließender Einspeisung in das Erdgasnetz möglich. Die verwendeten Substrate der Biogasanlagen reichen dabei heute von Schlachtabfällen über Abfälle aus der Biotonne, der Lebensmittelindustrie und der Landwirtschaft (wie z. B. Reste aus der Getreidereinigung) bis hin

zu Wirtschaftsdüngern und Energiepflanzen. Die anaerobe Umwandlung dieser Substrate im Fermentationsprozess wird im folgenden Kapitel erläutert.

2.2 Grundprinzip der Biogasproduktion

Das Grundprinzip der Biogasproduktion beruht auf dem anaeroben Abbau von organischem Material durch Mikroorganismen, also auf einer Gärung bzw. anaeroben Fermentation. Der Abbau der Makromoleküle bis zu kleineren Bausteinen erfolgt in vier Schritten, die im folgenden Schema dargestellt sind (Abbildung 2-1).

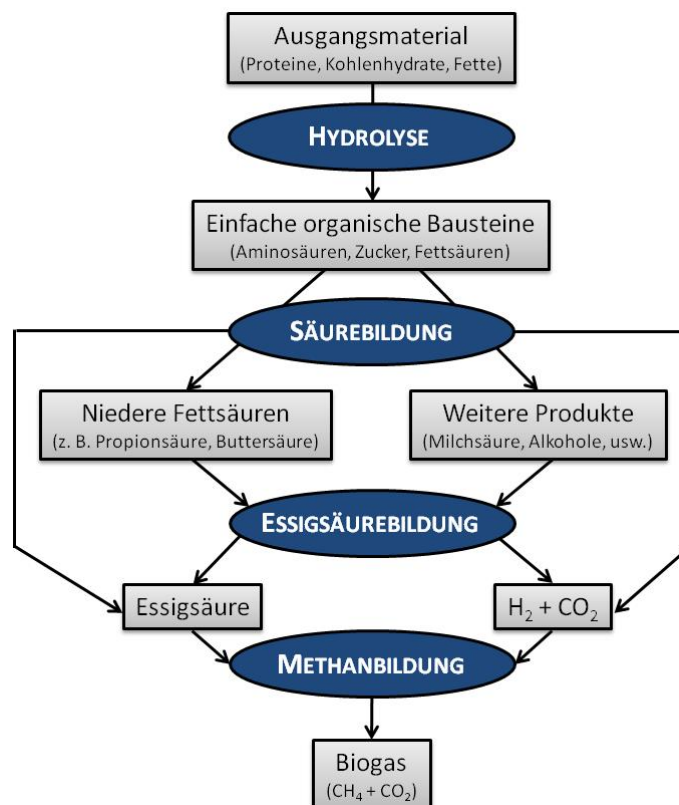


Abbildung 2-1: Schema der Biogasproduktion (nach FRIEHE *et al.*, 2010)

Im ersten Schritt, der **Hydrolyse**, wird das Ausgangsmaterial, bestehend aus Proteinen, Kohlenhydraten und Fetten, durch hydrolytische Bakterien enzymatisch zu einfacheren organischen Bausteinen wie Aminosäuren, Zuckern und Fettsäuren abgebaut. Im zweiten Schritt, der Säurebildung oder auch **Acidogenese**, entstehen durch acidogene Bakterien aus diesen organischen Bausteinen niedere Fettsäuren wie Essig-, Propion- und Buttersäure sowie Kohlendioxid und Wasserstoff. Als Nebenprodukte entstehen Milchsäure und Alkohole. Im dritten Schritt, der Essigsäurebildung bzw. **Acetogenese**, produzieren acetogene Bakterien die Vorläufersubstanzen des Biogases: Essigsäure, Wasserstoff und Kohlendioxid. Beim letzten Schritt, der Methanbildung oder **Methanogenese**, synthetisieren die Methanbildner das Biogas, ein Gemisch, wel-

ches hauptsächlich aus Methan (ca. 60 %) und Kohlendioxid (ca. 40 %) besteht. Neben dem Biogas entsteht infolge des Fermentationsprozesses in der Regel eine Suspension mit festen und flüssigen Anteilen, die in der weiteren Abhandlung als Gärprodukt bezeichnet wird und deren Eigenschaften im folgenden Kapitel beschrieben werden.

2.3 Stoffliche Eigenschaften von Gärprodukten

Die Zusammensetzung der Gärprodukte variiert in Abhängigkeit von den verwendeten Substraten und den Prozessbedingungen im Fermenter, insbesondere der Gärtemperatur und der Verweilzeit der Substrate. Das eingesetzte Substrat verändert sich durch den mikrobiellen Abbau dahingehend, dass ein Teil der organischen Substanz mineralisiert wird. Durch die Bildung der kohlenstoffhaltigen Hauptkomponenten des Biogases, Methan und Kohlendioxid, ist der Kohlenstoff- sowie der gesamte Trockensubstanzgehalt der Gärprodukte gegenüber dem ursprünglichen Substrat deutlich reduziert. Die Anteile weiterer Inhaltsstoffe, wie die wichtigen Pflanzennährelemente Stickstoff, Phosphor und Kalium, bleiben hingegen weitestgehend konstant. Allerdings wird durch den Mineralisierungsprozess organisch gebundener Stickstoff in Ammoniumstickstoff ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) umgewandelt, so dass sich der Anteil dieser pflanzenverfügbaren Stickstoffform am Gesamtstickstoff erhöht (ASMUS *et al.*, 1988). Auch beim Phosphor nimmt der organisch gebundene Anteil ab und der Anteil leicht löslicher, anorganischer Phosphate zu, wodurch ebenfalls die Pflanzenverfügbarkeit verbessert wird (BEER & SUNTHEIM, 2003). Der pH-Wert sinkt im Verlauf des Fermentationsprozesses zunächst ab und steigt dann, u. a. als Folge des Abbaus organischer Säuren, stark an.

2.3.1 Allgemeine Eigenschaften und wertgebende Inhaltsstoffe

Bei einer pflanzenbaulichen Verwertung der Gärprodukte als Dünger ist es notwendig, die genaue Zusammensetzung zu kennen. Insbesondere für Gärproduktproben aus der Nassfermentation wurden bereits verschiedene Studien durchgeführt. Eine Auswahl von Ergebnissen ist in Tabelle 2-1 dargestellt. Diese macht deutlich, dass die Schwankungsbreiten für einzelne Parameter sehr hoch sein können.

Tabelle 2-1: Literaturübersicht zur stofflichen Zusammensetzung von Gärprodukten mit Angabe von Minimum, Maximum sowie arithmetischem Mittelwert (fett).

Quelle	Anzahl	TS	oTS	N _{ges}	NH ₄ ⁺ -N	P _{ges}	K _{ges}	pH-Wert
		[% i. FM]	[% i. FM]	[g kg ⁻¹ FM]	[g kg ⁻¹ FM]	[g kg ⁻¹ FM]	[g kg ⁻¹ FM]	-
FAL, 2005 ¹	59	1,5 - 8,3 5,0	0,9 - 5,8 3,4	2,3 - 10,5 4,8	1,1 - 7,5 3,1	0,2 - 1,9 0,9	0,8 - 5,3 3,4	-
LTZ, 2008 ²	249	1,4 - 17,4 6,9	0,9 - 13,5 5,0	1,3 - 10,6 4,7	0,7 - 6,6 2,8	0,2 - 2,3 0,8	0,8 - 10,0 4,2	6,6 - 9,1 8,3
PÖTSCH, 2004 ³	87	0,5 - 9,2 3,9	-	0,5 - 8,4 3,2	0,4 - 6,2 1,8	0,1 - 2,1 0,5	0,3 - 7,1 2,6	7,3 - 9,1 8,0

¹⁾ untersucht wurden 58 Gärprodukte aus Kofermentationsanlagen (davon 29 mit Rinder- und 5 mit Schweinegülle, 5 Anlagen mit Rinder- und Schweinegülle sowie 19 Anlagen mit Gülle anderer Tierarten) und ein Gärprodukt aus einer Anlage mit reiner Pflanzenvergärung

²⁾ untersucht wurden 202 Gärprodukte aus Kofermentationsanlagen (darunter 137 mit Rinder- und 31 mit Schweinegülle sowie 34 Anlagen mit Gülle anderer Tierarten oder Mischgülle), 21 Gärprodukte aus Anlagen mit reiner Pflanzenvergärung und 26 Gärprodukte aus Bioabfallanlagen

³⁾ im größten Teil der Anlagen, aus denen die untersuchten Gärprodukte stammen, wurden Wirtschaftsdünger mit NawaRo oder Abfällen als Kofermente eingesetzt (davon 47 mit Rinder- und 16 mit Schweinegülle, in 11 Anlagen wurden Rinder- und Schweinegülle zusammen eingesetzt), 3 Gärprodukte wurden in Anlagen mit ausschließlicher Pflanzenvergärung produziert

Die **Trockensubstanzgehalte** (TS) der Gärprodukte, die in den drei Studien untersucht wurden, lagen zwischen 0,5 und 17,4 %. Die Mittelwerte der jeweiligen Einzelstudien liegen dabei zwischen 3,9 und 6,9 %. Der organische Trockensubstanzgehalt (oTS) der Gärprodukte wurde nur in zwei Studien bestimmt und lag insgesamt zwischen 0,9 und 13,5 % mit Einzelmittelwerten von 3,4 bzw. 5,0 %.

Die **Stickstoffgehalte** der Gärprodukte aus den drei Untersuchungen lagen insgesamt zwischen 0,5 und 10,6 g kg⁻¹ N mit Einzelmittelwerten zwischen 3,2 und 4,8 g kg⁻¹ N. Verglichen mit anderen Wirtschaftsdüngern, wie z. B. Rinder- und Schweinegülle, sind dies durchschnittliche Stickstoffgehalte. Relativ hoch waren demgegenüber die Anteile des leicht pflanzenverfügbaren Ammoniumstickstoffs (NH₄⁺-N) am Gesamtstickstoff (N_{ges}), die zwischen 54 und 64 % lagen. Der Anteil des sauerstoffhaltigen Nitrat-Stickstoffs (NO₃⁻-N) in den Gärprodukten wurde in den Studien nicht untersucht. Er macht jedoch anderen Autoren zufolge einen sehr geringen Teil aus (ERNST *et al.*, 2008, KIRCHMANN & BERNAL, 1997), da er im anaeroben Biogasprozess nicht gebildet werden kann. Der restliche Stickstoff liegt organisch gebunden vor.

An **weiteren Pflanzennährelementen** werden in den Studien die Gehalte an Phosphor und Kalium in den Gärprodukten dargestellt. Die Phosphorgehalte der untersuchten Gärprodukte lagen insgesamt zwischen 0,1 und 2,3 g kg⁻¹ P mit Einzelmittelwerten zwischen 0,5 und 0,9 g kg⁻¹ P. Eine Aufschlüsselung in verschiedene Phosphorformen erfolgt in den Studien nicht. Nach BEER & SUNTHEIM (2003) nimmt jedoch der leicht lösliche und somit pflanzenverfügbare Anteil des Phosphors von vergorener Gülle im Vergleich zur unvergorenen Gülle zu. So fanden sie für Rindergülle, dass sich durch die Vergärung der Anteil leicht löslichen Phosphors am Gesamtphosphor von ursprünglich 54 % auf 75 % erhöht. Die Kaliumgehalte der Gärprodukte in den drei Untersuchungen lagen insgesamt zwischen 0,3 und 10,0 g kg⁻¹ K mit Einzelmittelwer-

ten zwischen 2,6 und 4,2 g kg⁻¹ K. Neben diesen in der Tabelle aufgeführten Pflanzennährelementen enthalten Gärprodukte essentielle Makro- und Mikronährelemente wie Magnesium, Calcium und Schwefel (DÖHLER *et al.*, 2010).

Die **pH-Werte** wurden nur in zwei der drei Studien bestimmt. Diese lagen insgesamt zwischen 6,6 und 9,1 mit Einzelmittelwerten von 8,0 und 8,3 und somit etwas höher als die von Gülle, die im Bereich von 7,0 bis 7,5 liegen (DÖHLER *et al.*, 2010; ROSCHKE, 2004). Die hohen pH-Werte in Verbindung mit den hohen Ammoniumanteilen führen zu einem gesteigerten Risiko von Ammoniakausgasungen bei der Lagerung und während bzw. nach der Düngerausbringung, da sich das Gleichgewicht zwischen Ammonium und Ammoniak ab einem pH-Wert von 7,0 zugunsten des Ammoniaks verschiebt (DÖHLER *et al.*, 2010; FRICK *et al.*, 1996). In Versuchen zur Ammoniakausgasung nach einer Düngung mit Gärprodukten im Vergleich zu Gülle wurden jedoch für beide Dünger ähnlich hohe Ausgasungspotenziale gefunden (WULF *et al.*, 2002). Die Autoren begründeten dies damit, dass zwar das Ausgasungspotenzial von Gärprodukten aufgrund der chemischen Zusammensetzung zunächst höher sei als das der Gülle, jedoch die geringere Viskosität der Gärprodukte ein schnelleres Einsickern in den Boden zur Folge hätte, wodurch eine Ammoniakausgasung wiederum verringert werde.

Ein weiterer wichtiger Parameter für organische bzw. organisch-mineralische Dünger ist die **Zusammensetzung der organischen Substanz**. In Gärprodukten ist der Gehalt an organischer Substanz durch den hohen Mineralisierungsgrad, also durch die Umwandlung der organischen Substanz zu Methan und Kohlendioxid, im Vergleich zu den eingesetzten Substraten gering. Bezogen auf den TS-Gehalt ist jedoch der oTS-Gehalt von Gärprodukten vergleichbar mit denen von Gülle (GÖHLER & EMMERLING, 2007). Wie jedoch Versuche von MARCATO *et al.* (2009) zur Fraktionierung von Schweinegülle und fermentierter Schweinegülle zeigten, verändert sich durch die anaerobe Fermentation das Verhältnis der verschiedenen Bestandteile in der Trockensubstanz. Dabei wurden die Fraktionen NDF (soluble and neutral detergent fiber), ADF (acid detergent fiber), ADL (acid detergent lignin) sowie NDS (neutral detergent soluble) bestimmt und daraus die Gehalte an Lignin, Hemicellulose und Cellulose ermittelt. Den größten Anteil an der Trockensubstanz machte in beiden Fällen die Fraktion der leicht löslichen, nicht faserigen Bestandteile (NDS) aus. Er lag jedoch mit ca. 50 % i. TS bei der fermentierten Gülle deutlich niedriger als bei der Schweinerohgülle mit ca. 90 %. Demgegenüber waren die Anteile an Lignin, Hemicellulose und Cellulose in der TS höher als bei Rohgülle. Nach FRANCOU (2003) kann das Verhältnis von Lignin zu Hemicellulose und Cellulose als ein Stabilitätskriterium und zur Vorhersage der C-Mineralisierung von Kompost genutzt werden. Wendet man dieses Kriterium für die von MARCATO *et al.* (2009) untersuchten Gülle-Arten an, so ergibt sich für die Rohgülle ein Verhältnis von 0,24 und für das Gärprodukt von 0,44, was eine größere Stabilität der organischen Substanz des Gärproduktes bedeutet. Die Zusammensetzung der organischen Substanz von Düngern oder Pflanzenresten, die auf oder in den Boden gegeben werden, be-

stimmt das C-Mineralisierungsverhalten im Boden und hat somit Auswirkungen auf die gemessene Bodenatmung nach der Düngung (s. Kapitel 2.6.2).

Gärprodukte enthalten also wertvolle Pflanzennährelemente, die zum Teil in gut pflanzenverfügbarer Form vorliegen. Des Weiteren ist die enthaltene organische Substanz stabiler als die der Gülle, was auf eine positive Wirkung auf den Boden hindeutet. Als negativ kann dagegen der hohe Wassergehalt erachtet werden, da hierdurch die Nährstoffausbringung kostenintensiv ist.

2.3.2 Wertmindernde Inhaltsstoffe

Neben den nützlichen Inhaltsstoffen können Gärprodukte auch Schadstoffe oder Schaderreger enthalten.

Einige **Schwermetalle**, wie z. B. Kupfer und Zink, sind essentielle Spurennährelemente für Pflanzen und Tiere und deshalb bis zu einem gewissen Grad nicht umweltschädlich. Andere wiederum, wie Cadmium und Blei, sind als reine Schadstoffe anzusehen, für welche Grenzwerte für die Düngerausbringung bestehen. Die Gehalte an Schwermetallen in Gärprodukten werden ausschließlich von den eingesetzten Substraten und Prozesshilfsmitteln bestimmt, da diese während der Fermentation keinem mikrobiellen Abbau unterliegen. Nach PERETZKI *et al.* (2005) sind Substrate wie Mais, Getreide und Rüben, Trester, Gemüseabfälle, Schlemphen aus Brenneereien sowie Grüngut und Rasenschnitt aus der Landschaftspflege bezüglich ihres Gehaltes an Schwermetallen unbedenklich. Höhere Gehalte könnten sich dagegen in Straßenbegleitgrün und Schweinegülle befinden. Letztere kann insbesondere hoch mit Kupfer und Zink belastet sein. Eine erhöhte Belastung mit verschiedenen Schwermetallen können auch Flotatschlämme und Fettabscheiderinhalte aufweisen (PERETZKI *et al.*, 2005; PÖTSCH, 2004), wobei Fettabfälle vor allem mit Blei hoch belastet sein können (ZETHNER *et al.*, 2002).

Mikrobielle Schaderreger, wie Phytopathogene oder auf Mensch und Tier schädlich wirkende Bakterien, können ebenfalls über verschiedene Substrate, wie z. B. fusariumhaltige Getreidechargen oder mit bestimmten Bakterien belastete Gülle, in den Fermenter gelangen. Deren Überlebensrate ist dabei von verschiedenen Parametern, wie z. B. der Temperatur, der Verweilzeit oder dem pH-Wert, dem Gehalt an flüchtigen Fettsäuren und der Verfahrensweise (kontinuierlich oder diskontinuierlich) abhängig (DUMONTET *et al.*, 1999; OLSEN & LARSEN, 1987; FARRAH & BITTON, 1983; KEARNEY *et al.*, 1993). Der Einfluss von Temperatur und Verweilzeit auf die Überlebensraten verschiedener Bakterien, Viren und pilzlicher Schaderreger wurde gezielt von KNIE *et al.* (2001) untersucht. Zu den geprüften Schaderregern gehörten *Salmonella senftenberg*, *Escherichia coli*, *Streptococcus faecium*, *Clostridium perfringens*, *Plasmodiophora brassicae*, das Bovines Parvo-Virus sowie das Tabak-Mosaik-Virus (TMV). Als besonders widerstandsfähig erwiesen sich dabei das TMV sowie die Sporen des Bakteriums *Clostridium perfringens*, die durch eine einstündige Pasteurisierung bei 70 °C nicht inaktiviert wurden. Bei allen anderen untersuchten Organismen fand die wesentliche Keimzahlreduktion im thermophi-

len anaeroben Milieu in den ersten 24 Stunden statt. Bei der thermophilen Prozessführung liegen die Temperaturen zwischen 50 und 57 °C.

Ein weiterer, für die landwirtschaftliche Nutzung von Gärprodukten wichtiger Aspekt ist die Wirkung des Biogasprozesses auf in den Fermenter eingebrachte **Unkrautsamen**. Vor allem bei Verwendung von Substraten wie Wiesengras oder Getreideausputz könnte es, wenn die Samen den Fermentationsprozess überleben, zu einer starken Verbreitung der betreffenden Unkrautarten kommen. Auch hier gibt es temperatur- und verweilzeitabhängige Unterschiede in der Stabilität der Pflanzensamen. SCHRADE *et al.* (2003) untersuchten den Einfluss des Biogasprozesses auf die Keimfähigkeit der Samen von acht Kultur- und Unkrautarten. Dabei zeigten sich bei 32 bis 42 °C, sogenannter mesophiler Prozessführung, große Unterschiede zwischen den Pflanzenarten. Für die Samen von Winterweizen (*Triticum aestivum* L.), Raps (*Brassica napus* L.), Ackerfuchsschwanz (*Alopecurus myosuroides* Huds.) und Ackersenf (*Sinapis arvensis* L.) war eine Verweilzeit von 24 Stunden ausreichend, um deren Keimfähigkeit vollständig zu inaktivieren. Etwas robuster waren demgegenüber die Samen des Ackerhellerkrautes (*Thlaspi arvense* L.), der Tomate (*Solanum lycopersicum* L.) sowie des Stumpfbältrigen Ampfers (*Rumex obtusifolius* L.). Als besonders hartnäckig erwiesen sich die Samen des Weißen Gänsefußes (*Chenopodium album* L.), die ihre Keimfähigkeit erst nach einer Verweilzeit von drei Wochen vollständig verloren. Bei thermophiler Prozessführung war die Keimfähigkeit aller Samen bereits nach 24 Stunden auf 0 % reduziert. In einem anderen Versuch zeigten KNIE *et al.* (2001), dass Tomatensamen ihre Keimfähigkeit im mesophilen Biogasprozess nach 21 Tagen vollständig verlieren, im thermophilen Prozess demgegenüber bereits nach 24 Stunden. Die Bioabfallverordnung (BioAbfV)² schreibt für bestimmte Substrate eine Pasteurisierung (1 h bei 70 °C) vor. Diese reicht nach den Autoren ebenfalls für eine vollständige Inaktivierung der Tomatensamen aus. Bei Versuchen im Wasserbad mit unterschiedlichen Temperaturen erwiesen sich die Samen des Stumpfbältrigen Ampfers (*Rumex obtusifolius* L.) als besonders hartnäckig, ihre vollständige Keimfähigkeit verloren sie erst nach 180 Minuten im thermophilen Wasserbad. Diese untersuchten Problemstellungen sind insbesondere für die in der Bioabfallverordnung geforderte Hygienisierungspflicht von Bedeutung (s. Kapitel 2.4).

2.4 Rechtliche Regelungen zum Einsatz von Gärprodukten als Dünger

Bei der Nutzung von Gärprodukten als Dünger auf Acker- und Grünlandflächen müssen, abhängig von den eingesetzten Substraten, verschiedene rechtliche Regelungen aus den Berei-

² Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung – BioAbfV) vom 21. September 1998. BGBl 1, S. 2955, zuletzt geändert durch Art. 1 und Art. 4 V vom 23. April 2012, S. 611

chen Düngerecht, Abfallrecht und Hygienevorschriften für tierische Nebenprodukte beachtet werden. Im Folgenden wird eine Auswahl erläutert.

2.4.1 *Düngerechtliche Regelungen*

Ungeachtet der verwendeten Substrate müssen bei einem Einsatz von Gärprodukten als Dünger immer die Regelungen des Düngegesetzes (DüG)³, der Düngemittelverordnung (DüMV)⁴ sowie der Düngeverordnung (DüV)⁵ beachtet werden.

Nach dem **Düngegesetz** zählen tierische Ausscheidungen oder pflanzliche Stoffe, die im Rahmen der pflanzlichen Erzeugung oder in der Landwirtschaft auch in Mischungen untereinander oder nach aerober oder anaerober Behandlung anfallen oder erzeugt werden, als Wirtschaftsdünger. Hierunter fallen somit die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Gärprodukte.

Die **Düngemittelverordnung** teilt Stoffe in Abhängigkeit von ihren Nährstoffgehalten, den verwendeten Ausgangsstoffen und den Einsatzbereichen in Düngemittel, Wirtschaftsdünger, Bodenhilfsstoffe, Kultursubstrate und Pflanzenhilfsmittel ein. Des Weiteren beinhaltet die Verordnung eine Kennzeichnungspflicht bei Weitergabe an Dritte. Darüber hinaus müssen unter anderem Grenzwerte für Schad- und Fremdstoffe sowie Vorgaben zur seuchen- und phytohygienischen Unbedenklichkeit eingehalten werden. Außerdem enthält die Düngemittelverordnung im Anhang 2 eine abgeschlossene Positivliste für zulässige Ausgangsstoffe, die somit auch für Gärprodukte aus Biogasanlagen gilt.

Die **Düngeverordnung** regelt die gute fachliche Praxis beim Düngen und soll stoffliche Risiken bei der Anwendung von Düngern vermindern. Haben Gärprodukte wesentliche Nährstoffgehalte, dann müssen bei ihrer Verwendung die Vorgaben der Düngeverordnung eingehalten werden. Die wichtigsten davon sind:

- Ermittlung des Nährstoffbedarfs der Kultur sowie der verfügbaren Nährstoffmengen im Boden vor der Düngung,
- Ermittlung der Nährstoffgehalte der Düngemittel vor der Ausbringung,
- Einhaltung der N-Obergrenze von $170 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ Gesamtstickstoff im Durchschnitt der landwirtschaftlich genutzten Flächen für Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft,

³ Düngegesetz vom 09. Januar 2009. BGBl 1, S. 54, zuletzt geändert durch Art. 1 G vom 15. März 2012, S. 481

⁴ Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung – DüMV) vom 16. Dezember 2008. BGBl 1, S. 2524, zuletzt geändert durch die Verordnung vom 14. Dezember 2009, S. 3905

⁵ Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung – DüV) vom 10. Januar 2006. BGBl 1, S. 33, Neufassung vom 27. Februar 2007, BGBl 1, S. 221, zuletzt geändert durch Art. 5 Abs. 36 G vom 24.2.2012, S. 212

- Einhaltung der N-Obergrenzen bei der Ausbringung organischer und organisch-mineralischer Düngemittel nach der Ernte der letzten Hauptfrucht vor dem Winter (max. 40 kg ha⁻¹ Ammoniumstickstoff bzw. max. 80 kg ha⁻¹ Gesamtstickstoff),
- unverzügliche Einarbeitung auf unbestelltem Ackerland,
- Einhaltung der Kernsperrfrist (vom 01.11. bis 31.01. auf Ackerland und vom 15.11. bis 31.01. auf Grünland),
- Ausbringverbot auf Flächen, die überschwemmt, gefroren oder durchgängig höher als 5 cm mit Schnee bedeckt sind,
- Einhaltung der Mindestabstände zu oberirdischen Gewässern sowie Berücksichtigung der Vorschriften bei der Ausbringung auf stark geneigten Flächen.

Für die Verwendung von Düngemitteln im ökologischen Landbau gibt es zusätzliche Bestimmungen zu beachten. Grundsätzlich ist die Verwendung von Gärprodukten aus der Biogas-erzeugung als Düngemittel gemäß Artikel 3 Absatz 1 und Anhang 1 der EG-Verordnung 889/2008 (Durchführungsvorschriften zur neuen EG-Öko-Basisverordnung)⁶ jedoch erlaubt.

2.4.2 Regelungen für Gärprodukte aus Bioabfällen und tierischen Nebenprodukten

Werden im Biogasprozess Bioabfälle verwendet, das heißt Substrate, die im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG)⁷ (§ 3 Absatz 1) Abfalleigenschaften aufweisen, müssen neben den oben genannten düngerechtlichen Regelungen außerdem abfallrechtliche Regelungen beachtet werden. Bei der Verwendung von Substraten, die im Sinne der Verordnung (EG) Nr. 1069/2009⁸ tierische Nebenprodukte sind (hierunter fällt auch Gülle), müssen veterinärrechtliche Regelungen beachtet werden. Werden sowohl Abfälle als auch tierische Nebenprodukte als Substrate verwendet, müssen beide Rechtsbereiche beachtet werden.

Abfallrechtliche Regelungen

Für „Gärprodukte aus Bioabfall“ muss europaweit die Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG⁹ beachtet werden. In Deutschland wurde diese Richtlinie durch das KrWG und die Bioabfallverord-

⁶ Verordnung (EG) Nr. 889/2008 der Kommission vom 5. September 2008 mit Durchführungsvorschriften zur Verordnung (EG) Nr. 834/2007 des Rates über die ökologische/biologische Produktion und die Kennzeichnung von ökologischen/biologischen Erzeugnissen hinsichtlich der ökologischen/biologischen Produktion, Kennzeichnung und Kontrolle. Abl. L 250 vom 18. September 2008, S. 1

⁷ Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG) vom 24. Februar 2012. BGBl 1, S. 212

⁸ Verordnung (EG) Nr. 1069/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 mit Hygienevorschriften für nicht für den menschlichen Verzehr bestimmte tierische Nebenprodukte und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 1774/2002 (Verordnung über tierische Nebenprodukte). Abl. L 300 vom 20. Oktober 2010, S. 33

⁹ Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien. Abl. L 312 vom 22. November 2008, S. 3

nung (BioAbfV) umgesetzt. Das KrWG regelt, wann ein Stoff Abfalleigenschaften aufweist. Nach KrWG § 3 Absatz 1 sind Abfälle alle beweglichen Sachen, deren sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss. In der BioAbfV sind unter anderem die Hygienisierungsvorschriften für Bioabfälle geregelt, Grenzwerte und Untersuchungszyklen für Schwermetalle und Fremdstoffe, wie Glas, Kunststoff, Metall und Steine vorgeschrieben, sowie Nachweispflichten (Lieferscheinverfahren) und Meldung der Aufbringungsfläche gegenüber der für die BioAbfV zuständigen Behörde bei erstmaliger Aufbringung gefordert. Ob Gärprodukte auf Grünland ausgebracht werden dürfen, ist im Anhang 1 dieser Verordnung festgelegt. Danach dürfen z. B. Gärprodukte aus Garten- und Parkabfällen, Fettabscheiderinhalten, Tabakrückständen und vielen anderen Bioabfällen auf Grünland verwendet werden. Nicht erlaubt ist dagegen die Ausbringung der Gärprodukte auf Grünland, wenn Altbrot, Teigabfälle, Biotonneninhalte, abgetragene Pilzkultursubstrate, Glycerin aus der Biodieselherstellung oder biologisch abbaubare Werkstoffe (BAW's) als Biogassubstrate eingesetzt werden.

Veterinärrechtliche Regelungen

Für „Gärprodukte aus tierischen Nebenprodukten“ muss europaweit die Verordnung (EG) Nr. 1069/2009 beachtet werden. In Deutschland wurde diese Verordnung durch das Tierische Nebenprodukte Beseitigungsgesetz (TierNebG)¹⁰ sowie die Tierische Nebenprodukte Beseitigungsverordnung (TierNebV)¹¹ umgesetzt. In der TierNebV sind die Registrierungspflicht für Transporteure und Behandlungsanlagen, das Handelspapierverfahren für die Rückverfolgbarkeit sowie Untersuchungspflichten geregelt. Gülle ist von solchen Vorschriften ausgenommen.

2.5 Stoffkreisläufe und Wirkungen von Kohlenstoff und der Pflanzennährelemente Stickstoff, Phosphor und Kalium

Der Kohlenstoffkreislauf sowie die Kreisläufe der Pflanzennährelemente spielen bei der Betrachtung des Biogasprozesses eine wichtige Rolle. Stickstoff, Phosphor und Kalium gehören zu den wichtigsten Elementen für die Pflanzenernährung. Auf die Stoffkreisläufe, die chemischen Eigenschaften in Boden und Pflanzen sowie auf die daraus resultierenden Konsequenzen für die Düngung mit diesen Nährelementen soll im folgenden Kapitel eingegangen werden.

¹⁰ Tierische Nebenprodukte Beseitigungsgesetz (TierNebG) vom 25. Januar 2004. BGBl 1, S. 82

¹¹ Verordnung zur Durchführung des Tierische Nebenprodukte Beseitigungsgesetzes (Tierische Nebenprodukte Beseitigungsverordnung – TierNebV) vom 27. Juli 2006. BGBl 1, S. 1735

2.5.1 Kohlenstoff

Der Kohlenstoffkreislauf beschreibt den komplexen Vorgang des Kohlenstoffaustauschs zwischen Hydrosphäre, Lithosphäre, Pedosphäre, Atmosphäre und Biosphäre. Global gesehen ist die Lithosphäre mit Abstand der größte Kohlenstoffspeicher. In ihr ist Kohlenstoff z. B. in Form von Sedimenten, Kohle, Erdgas und Erdöl gespeichert und wird unter natürlichen Umständen durch Verwitterung nur langsam freigesetzt. In der Hydrosphäre kommt Kohlenstoff hauptsächlich in Form von gelöstem Kohlendioxid, Hydrogencarbonat (HCO_3^-) und Carbonat (CO_3^{2-}) sowie in organischer Form im Plankton vor (DENMAN *et al.*, 2007). Die Atmosphäre sowie die Biosphäre enthalten demgegenüber im Verhältnis nur sehr wenig Kohlenstoff. In der Atmosphäre liegt Kohlenstoff u. a. gebunden in Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4), Kohlenmonoxid (CO), FCKW und Ruß vor. Die beiden größten Anteile stellen CO_2 mit etwa 380 ppm und CH_4 mit etwa 1.775 ppb dar (Stand 2005). Diese Anteile sind jedoch in den letzten 250 Jahren stark angestiegen. Bis zum Jahr 1750 lagen die Werte seit etwa 10.000 Jahren relativ stabil zwischen 260 und 280 ppm CO_2 und bei etwa 799 ppb CH_4 (DENMAN *et al.*, 2007). In der Biosphäre kommt Kohlenstoff hauptsächlich als Bestandteil organischer Verbindungen vor. Die Stoffströme, welche innerhalb und zwischen den vier Systemen bestehen, können in kurzfristige und langfristige Abläufe unterteilt werden.

Für die **landwirtschaftliche Betrachtungsweise** interessieren im Wesentlichen der Gehalt in der oberen durchwurzelten Bodenschicht, der Austausch mit der Atmosphäre sowie die Wechselwirkungen mit der Biosphäre. Diese Stoffkreisläufe sind in der Regel kurzfristig, unterliegen somit größeren Schwankungen und sind größtenteils abhängig von den Jahreszeiten. Der landwirtschaftliche Kohlenstoffkreislauf ist in Abbildung 2-2 schematisch dargestellt.

zweiter und höherer Ordnungen nehmen andere Lebewesen als Nahrung auf und wandeln sie in Energie um. Bei Tieren und vielen Mikroorganismen geschieht dieser Abbau über die Atmung, bei der Kohlenstoff aus organischen Verbindungen zu CO_2 mineralisiert und damit wieder an die Atmosphäre abgegeben wird. Auch die Pflanzen atmen, so dass zwischen Brutto- und Netto- CO_2 -Assimilation zu unterscheiden ist. Eine andere Form der Energiegewinnung aus organischer Substanz, welche von einigen Mikroorganismen genutzt wird, ist die **Gärung**. Bei diesem Prozess werden keine externen Elektronenakzeptoren wie z. B. Sauerstoff benötigt. Auch im Biogasprozess nutzen verschiedene Mikroorganismen unterschiedliche anaerob ablaufende Prozesse, um organische Substanzen in Energie umzuwandeln. Im letzten Schritt entstehen durch die methanogenen Archaeen Methan und Wasser (vgl. Kapitel 2.2). Methan wird z. B. im BHKW verbrannt und dabei zu CO_2 oxidiert. Die freiwerdende CO_2 -Menge entspricht derjenigen, die vorher durch Pflanzen fixiert wurde. Aus diesem Grund wird der Biogasprozess häufig als CO_2 -neutral bezeichnet. Bei dieser Betrachtungsweise werden jedoch CO_2 -Emissionen, die durch den Anbau von Energiepflanzen entstehen wie z. B. durch die Nutzung fossiler Brennstoffe für Traktoren, außer Acht gelassen.

Der Stoffstrom des Kohlenstoffs aus der Atmosphäre über die Pflanzen, die heterotrophen Organismen und zurück in die Atmosphäre kann auch über den **Boden** ablaufen. Im Boden kommt Kohlenstoff zum einen gebunden in organischer Substanz (C_{org}), zum anderen in Form von Carbonaten vor. Der Gesamtgehalt an Kohlenstoff (C_{ges}) entspricht somit der Summe aus C_{org} und Kohlenstoff aus Carbonat. A_n -Horizonte von Wald- und Ackerböden weisen in der Regel C-Gehalte zwischen 7,5 und 20 g kg^{-1} auf. Stark humose bzw. Moorböden können deutlich höhere Gehalte, sandige Böden aber auch geringere Werte aufweisen (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002).

Der C_{org} -Gehalt ist ein Maß für die **organische Bodensubstanz** (OBS). Der Begriff OBS wird unterschiedlich definiert. Nach MÜLLER (1980) wird unter organischer Bodensubstanz „*allgemein die im Boden integrierte lebende und abgestorbene organische Substanz verstanden, wobei erstere die bodenbürtigen (autochthonen) Kleinlebewesen, das Edaphon und letztere den Humus darstellt*“. Dieser Definition haben sich verschiedene Autoren wie SCHROEDER & BLUM (1992) sowie KÖRSCHENS *et al.* (1997) angeschlossen. Nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (2002), DIEPENBROCK *et al.* (2005) und STAHR *et al.* (2008) versteht man unter OBS alle in und auf dem Mineralboden befindlichen abgestorbenen pflanzlichen und tierischen Stoffe sowie deren Umwandlungsprodukte. Die Begriffe OBS und Humus werden in diesem Fall teilweise synonym verwendet.

Da es keine direkte Methode zur Bestimmung des Gehaltes an OBS bzw. Humus gibt, hat sich in der praktischen Umsetzung die indirekte Bestimmung der OBS über den C_{org} -Gehalt durchgesetzt. Da die organische Bodensubstanz nach KONONOVA (1958) im Mittel zu ca. 58 % aus C_{org} besteht, hat sich die Berechnung des Humusgehaltes über die Multiplikation des C_{org} -

Gehaltes mit dem Faktor 1,724 durchgesetzt. Auch hierzu gibt es jedoch unterschiedliche Ansichten. Nach KÖRSCHENS *et al.* (1997) liegen die in der Literatur verwendeten Faktoren zur Berechnung des Humusgehaltes aus dem C_{org} -Gehalt zwischen 1,4 und 3,3. Da bei der Bodenprobenahme zur Analyse des C_{org} -Gehaltes nicht zwischen lebender und abgestorbener Substanz unterschieden werden kann, entspricht der so ermittelte Gehalt an OBS der zuerst genannten Definition.

Die organische Bodensubstanz ist sehr heterogen, je nach Abbaugrad unterscheidet man Streustoffe, Nichthuminstoffe und Huminstoffe (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002). Humus hat für den Boden bedeutende Aufgaben. Er bewirkt z. B. eine verbesserte Nährstoff- und Schadstoffspeicherung, fördert die bodenbiologische Aktivität und verbessert physikalische Eigenschaften wie die Aggregatstabilität, das Wasserspeichervermögen sowie die Erwärmung.

Zur Abschätzung der Abbaustabilität unterscheidet man zwischen einer inerten, nicht umsetzbaren Fraktion und einer aktiven, umsetzbaren Fraktion. Die leicht umsetzbare Fraktion wird in der chemischen Analytik über den heißwasserlöslichen Kohlenstoff (C_{hwl}) erfasst. Diese Fraktion enthält nach SCHULZ (1997) Teile der mikrobiellen Biomasse, einfache organische Verbindungen und durch Wasser hydrolysierbare bzw. depolymerisierbare organische Bestandteile des Bodens. Der C_{hwl} -Gehalt ergibt multipliziert mit dem Faktor 15 einen Näherungswert für die umsetzbare OBS (OBS_{ums}) und kann somit als Maß für den Versorgungszustand des Bodens mit umsetzbarer organischer Substanz gesehen werden (KÖRSCHENS *et al.*, 1990), ohne dabei zu starken zeitlichen Schwankungen zu unterliegen (SCHULZ, 1997).

Die organische Bodensubstanz wird von Bodenmikroorganismen oder anderen Bodenlebewesen zersetzt bzw. mineralisiert, das heißt sie wird zu anorganischen Stoffen wie CO_2 und H_2O abgebaut, wobei auch Pflanzennährstoffe freigesetzt werden. Dieser Mineralisierungsprozess verlangsamt sich mit fortschreitender Humifizierung der organischen Substanz. Die pflanzlichen und mikrobiellen Reste und ihre Umwandlungsprodukte stabilisieren sich zunehmend in Form von Huminstoffen. Die abgebaute organische Substanz wird dagegen zu CO_2 veratmet, welches freigesetzt wird und somit als Bodenatmung messbar ist (vgl. Kapitel 2.6.2). Durch diese Abbauprozesse schließt sich der über den Boden ablaufende Kohlenstoffkreislauf somit wieder.

2.5.2 Stickstoff

Stickstoff ist mit 78 % der Hauptbestandteil der Erdatmosphäre. In Mineralböden beträgt sein Anteil 0,02 bis 0,40 %, was einem Stickstoffvorrat zwischen 900 und 18.000 kg ha⁻¹ in den oberen 30 cm Boden entspricht. In der Regel liegen die Gehalte zwischen 2.000 und 8.000 kg ha⁻¹ N, wovon ca. 90 % organisch gebunden vorliegen (SCHILLING, 2000).

Der landwirtschaftliche **Stickstoffkreislauf** spielt sich zwischen Atmosphäre, Biosphäre und Pedosphäre ab und wird u. a. stark von Mikroorganismen beeinflusst (Abbildung 2-3).

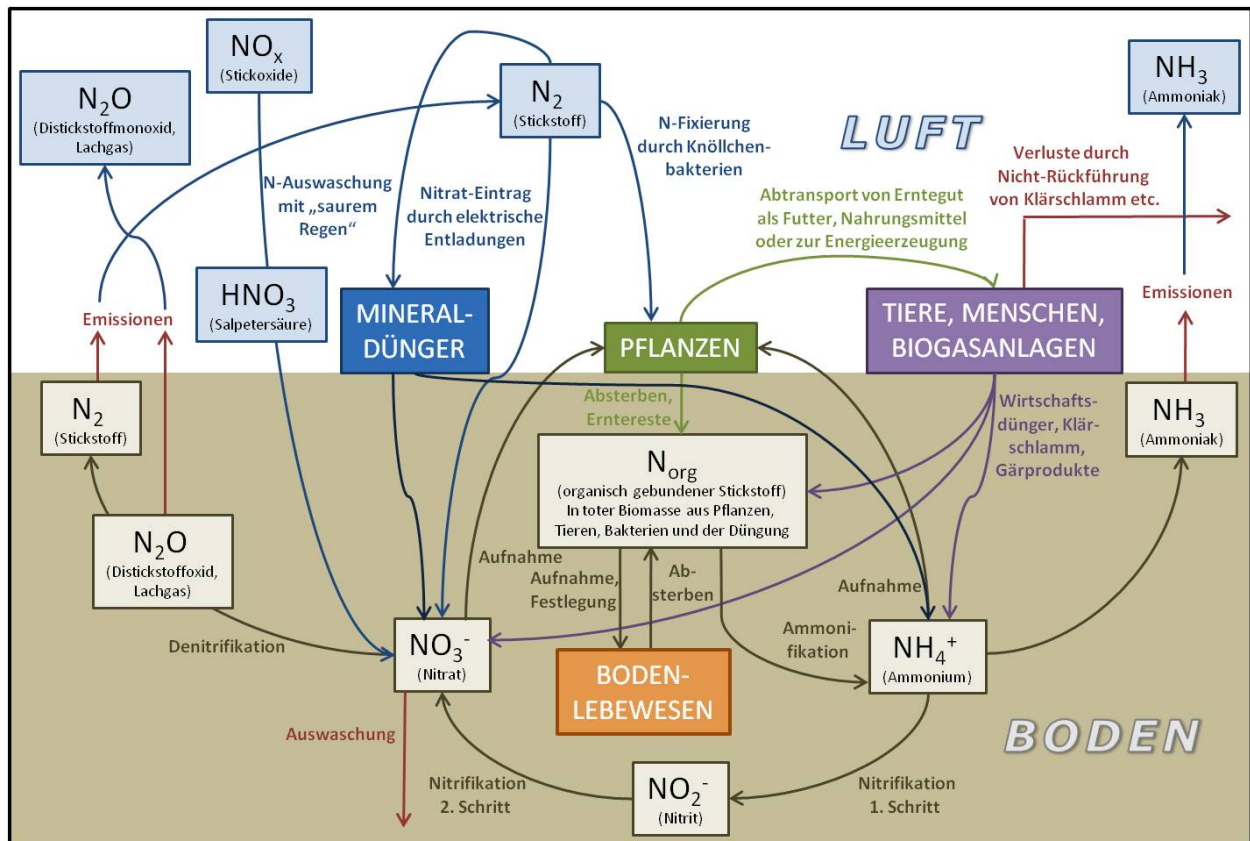


Abbildung 2-3: Schema des landwirtschaftlichen Stickstoffkreislaufs (eigene Darstellung)

Da Stickstoff im Gegensatz zu anderen Elementen, wie z. B. Schwefel, nicht im Ausgangsgestein der Böden vorkommt, gelangt er auf natürlichem Wege hauptsächlich über die Luft **in den Boden**. Hierbei macht der Eintrag durch stickstofffixierende Prokaryonten den größten Anteil aus. Auch durch elektrische Entladungen (Gewitter), bei denen durch hohe Temperaturen Nitrat entsteht, gelangt Stickstoff in den Boden. Ein weiterer Eintragsweg ist der „saure Regen“, der u. a. Salpetersäure aus den Stickoxiden (NO_x) der Abgase enthält. Der von den Pflanzen aus dem Boden aufgenommene Stickstoff gelangt im natürlichen Stickstoffkreislauf in Form von abgestorbener pflanzlicher Biomasse oder als tierische Exkremente wieder in den Boden. Im landwirtschaftlichen Stickstoffkreislauf wird die pflanzliche Biomasse in Form des Ernteguts abgefahren, das Nährstoffdefizit wird durch die Zufuhr von mineralischen und organischen Düngern wieder geschlossen. **Im Boden** liegt der Stickstoff also entweder organisch gebunden (N_{org}) oder in mineralischer Form, hauptsächlich als das für Pflanzen verfügbare Ammonium (NH_4^+) oder Nitrat (NO_3^-), vor. Organisch ist er zum Teil in Form von pflanzlicher und mikrobieller Biomasse sowie durch Humus vorübergehend festgelegt, das heißt er steht nicht für mikrobielle Umsetzungsprozesse zur Verfügung. Der in Proteinen, Aminosäuren oder Harnstoff organisch gebundene Stickstoff aus nicht lebender bzw. stabiler abgestorbener Biomasse steht der Umsetzung durch Bakterien zur Verfügung. Durch sie wird er entweder mineralisiert oder wieder in Bakterienbiomasse festgelegt. Der Prozess der **Mineralisierung** ist für die Pflanzenernährung

sehr wichtig und besteht aus den beiden Teilprozessen Ammonifikation und Nitrifikation. Bei der **Ammonifikation** entsteht aus dem organischen Stickstoff über desaminierende Bakterien Ammoniak (NH_3), wobei dieses in einem pH-Wert-abhängigen Gleichgewicht mit Ammonium (NH_4^+) steht. Die biochemische Reaktion der Ammonifikation ist temperaturabhängig und hat ihr Optimum bei ca. 50 °C (MYERS, 1975; BECK, 1983). Auch eine hohe Bodenfeuchte wirkt fördernd auf den Prozess (SINDHU & CORNFELD, 1967). Das entstehende Ammonium kann bereits als Pflanzennährstoff dienen. Unter normalen Bodenverhältnissen schließt sich jedoch der zweite Teilschritt der Mineralisierung, die **Nitrifikation**, direkt an. Dabei wird das Ammonium durch Bakterien über Nitrit (NO_2^-) zu Nitrat (NO_3^-) umgewandelt. Dieser Prozess ist ebenfalls temperaturabhängig, wobei das Temperaturoptimum mit 20-35 °C niedriger als bei der Ammonifikation liegt (MYERS, 1975; BECK, 1983, MALHI & MCGILL, 1982). Auch pH-Wert und Sauerstoffgehalt des Bodens (durch streng aerob lebende Bakterien) haben einen Einfluss. Durch Düngung ausgebrachtes Ammonium kann innerhalb weniger Tage durch diesen Prozess im Boden zu Nitrat umgewandelt werden (BERNAL & KIRCHMANN, 1992). Das entstehende Nitrat stellt für die Pflanzen den wichtigsten Nährstoff dar.

Nach der Aufnahme des Nitrats über die Wurzeln der Pflanzen erfolgt über den Weg der assimilatorischen Nitratreduktion der Einbau des reduzierten Stickstoffs (NH_4^+) in organische Verbindungen wie Aminosäuren, Proteine oder Nucleinsäuren (s. u.). Nach dem Absterben der Pflanzen oder ihrem Verzehr durch Tiere oder Menschen und Rückführung von Exkrementen gelangt der Stickstoff, zum größten Teil in Form von frischem unzersetztem organischem Material, der organischen Primärschubstanz, wieder in den Boden. Ein Teil des Stickstoffs wird zunächst in Form von Huminstoffen festgelegt. Der Stickstoff in leicht abbaubarer organischer Substanz wird jedoch infolge der Abbauprozesse durch Mikroorganismen mineralisiert und dem Kreislauf wieder zugeführt.

Es gibt aber auch Pfade, über die Stickstoff den Boden verlassen kann und über welche dann **Stickstoffverluste** für den Boden bzw. die Pflanzen entstehen. Neben den endgültigen Stickstoffverlusten gibt es vorläufige N-Festlegungen, bei denen der Stickstoff im Boden verbleibt aber den Pflanzen nicht als Nährelement zur Verfügung steht. Dies kann zum einen die bereits erwähnte N-Festlegung durch Bakterien sein, zum anderen kann Ammonium an Tonmineralen fixiert werden, was insbesondere bei Kaliummangel im Boden auftritt (NIELSEN, 1972; SCHERER, 1989). Endgültige N-Verluste des Bodens sind dagegen Ammoniakausgasungen und Nitratauswaschungen, welche durch die mangelnde Sorption des Nitrations im Boden zustande kommen und im Winter auf Ackerflächen 30 bis 60 kg ha⁻¹ N betragen können. Weitere endgültige N-Verluste des Bodens können durch die Freisetzung von Lachgas (N_2O) und Stickstoff (N_2) infolge von Denitrifikationsprozessen unter anaeroben Verhältnissen sowie durch den Abtransport von Erntegut entstehen.

Stickstoff ist das wichtigste Pflanzennährelement und hat somit den größten Einfluss auf den Ertrag. **In den Pflanzen** ist er unter anderem Bestandteil von wichtigen Verbindungen wie Proteinen, Nucleinsäuren, Vertretern des Vitamin-B-Komplexes, den Chlorophyllen sowie von Cytochromen. Auf die Qualität der Ernteprodukte kann Stickstoff jedoch unterschiedliche Wirkungen haben, weshalb die Auswahl der Art und Höhe einer Stickstoffdüngung stets unter Berücksichtigung von Pflanzen- und Bodenart, Ertragszielen, Umweltaspekten und Düngungszeitpunkten erfolgen sollte. Über die Pflanzenwurzeln kann Stickstoff in Form von Nitrat (NO_3^-), Ammonium (NH_4^+) oder in organischer Form als Harnstoff ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$) aufgenommen werden. Zur Bildung stickstoffhaltiger organischer Verbindungen ist jedoch in jedem Fall die Umwandlung in Ammonium notwendig, welche entweder direkt in der Wurzel oder in den Blättern stattfindet. Aus dem Ammonium werden Aminosäuren und Amide aufgebaut, die über Xylem und Phloem in die jungen, wachsenden Organe transportiert werden, wo sie zum Aufbau von Enzymen und Proteinen zur Verfügung stehen. Bei Samenpflanzen werden gegen Ende der Vegetationsperiode die Blattproteine abgebaut und über Transportaminosäuren in die Früchte verlagert, wo aus ihnen Samenproteine gebildet werden. Nitrit und Ammonium werden nicht angereichert, da dies für die Pflanzen giftig wäre. Nitrat kann dagegen in Vakuolen als Reservestoff gespeichert und bei Bedarf mobilisiert werden. Dadurch kann der Nitratgehalt der Pflanzen als Indikator für den N-Ernährungszustand dienen, was in Nitratschnelltests zur Kalkulation von Stickstoffdüngergaben genutzt wird.

Die richtige Bemessung der Düngergaben ist sehr wichtig. **Stickstoffmangel** in der Pflanze führt infolge eines Enzymmangels zur Verringerung der Wachstumsrate. Zudem kann es zum Abbau von Chloroplasten kommen, wodurch sich insbesondere ältere Blätter hellgrün bis gelb verfärben. Ebenfalls ein Zeichen für N-Mangel ist ein steifes Erscheinungsbild der Blätter (Starrtracht) durch verdickte Zellwände, welches auftritt, wenn Assimilate nicht mehr ausreichend in Proteine umgesetzt werden können.

Bei einer **Übersorgung mit Stickstoff** kann es zu Ammoniakvergiftungen bis hin zu Blattnekrosen kommen. Ein weiterer äußerlich sichtbarer Effekt ist die z. B. bei Getreide auftretende Lagerbildung, die durch mangelnde Ausbildung des Stützgewebes bei gleichzeitig verstärktem Längenwachstum der Stängel bzw. Halme auftritt. Außerdem kann sich die Abreife der Pflanzen verzögern, da der Stickstoffabbau in den alten Organen verlangsamt ist.

Neben den äußerlich sichtbaren Symptomen von N-Mangel und -Überschuss wird auch die **chemische Zusammensetzung der Pflanze** maßgeblich durch die Stickstoffversorgung beeinflusst. Bei hohen Stickstoffgaben verändert sie sich dahingehend, dass der Proteingehalt, besonders aber der Gehalt an löslichen Stickstoffverbindungen zunimmt. Der Zuckergehalt sinkt dagegen, was nicht nur bei Zuckerrüben unerwünscht ist, sondern auch einen negativen Effekt bei der Silierung von z. B. Mais hat. Durch den geringen Zuckergehalt wird nicht ausreichend Milchsäure gebildet, wodurch der benötigte niedrige pH-Wert nicht erreicht wird. Zusätzlich ver-

hindert eine hohe Pufferkapazität des Siliergutes durch z. B. einen hohen Anteil von Proteinen das Absinken des pH-Wertes. Anders sind demgegenüber die Wirkungen der Stickstoffdüngung auf die generativen Pflanzenorgane, insbesondere bei Getreidekörnern. Mit steigenden Stickstoffgaben nehmen die Stroh- und Kornerträge zu. Die Kornerträge erreichen schneller ihr Maximum, so dass bei sehr hohen Stickstoffgaben bezogen auf den Kornertrag mehr Stroh entsteht (DELOGU *et al.*, 1998; DENNERT, 2007). Im Gegensatz zu den vegetativen Teilen sinkt bei steigender N-Düngermenge der Proteingehalt im Korn zunächst, bei sehr hohen Gaben nimmt er wieder zu. Diese Ertragsbildungsprozesse sind nicht nur von der N-Menge, sondern u. a. auch vom Zeitpunkt der Düngung abhängig. Durch Variation von Düngermenge und -zeitpunkt wird in der Praxis versucht, den Getreideertrag zu optimieren. Brau- oder Futtergerste, Qualitäts- oder Massenweizen bedürfen jeweils anderer Düngestrategien. Häufig wird die gesamte N-Menge auf drei Düngergaben während verschiedener Entwicklungsstadien verteilt.

Bei der Stickstoffdüngung kommen **organische Dünger** wie Gülle, Stallmist, Gärprodukte und Komposte sowie mineralische Dünger zum Einsatz. Die organischen Dünger enthalten sowohl den langsam wirkenden organisch gebundenen als auch bereits mineralisierten, schnell pflanzenverfügbaren Stickstoff in Form von Nitrat und Ammonium. Die **mineralischen Stickstoffdünger** enthalten mindestens eine der Stickstoffformen Nitrat, Ammonium oder auch die organische Verbindung Harnstoff (Amid-N). In dem in Deutschland sehr häufig eingesetzten Kalkammonsalpeter (KAS) sind die beiden schnell wirkenden Stickstoffformen Ammonium und Nitrat jeweils zu 13,5 % enthalten. Ammoniumnitrat-Harnstofflösung (AHL) enthält alle drei Stickstoffformen: Ammonium und Nitrat zu je 7 % und 14 % Harnstoff. Stabilisierter Harnstoff besteht zu 44 % aus Amid-N, welches sowohl über die Wurzel als auch über die Blätter aufgenommen werden kann. Aufgrund der Gefahr von Stickstoffverlusten durch die rasche Hydrolyse zu Ammoniak (NH_3) sollte stabilisierter Harnstoff am besten bei kühler und feuchter Witterung ausgebracht werden. Neben den reinen Stickstoffdüngern kommen auch häufig verschiedene Mehrnährstoffdünger wie z. B. NP- oder NPK-Dünger zum Einsatz (KNITTEL & ALBERT, 2003).

2.5.3 Phosphor

Der Phosphorgehalt ungedüngter Böden hängt vom Ausgangsgestein, der Textur sowie dem Entwicklungsstadium der Böden ab. Die meisten Böden weisen Phosphorgehalte zwischen 0,02 und 0,15 % auf. Dies entspricht einem P-Vorrat von 900 bis 6.750 kg ha⁻¹ in den oberen 30 cm Boden. P-Gehalte unter 100 mg kg⁻¹ Boden bzw. 0,01 % sind seltener, jedoch z. B. bei Sandböden und Podsolen zu finden. Phosphor liegt sowohl in mineralischen als auch organischen Formen im Mineralboden vor, wobei der organische Anteil zwischen 25 und 60 % beträgt (SCHILLING, 2000).

Der **Phosphorkreislauf** steht, anders als beim Stickstoff, nicht im Austausch mit der Atmosphäre, da kaum gasförmige P-Verbindungen existieren. Er ist stark beeinflusst durch das Ausgangsgestein des Bodens. Anorganisch kommt Phosphor im Boden u. a. in Form von definierten Ca-, Al- und Fe-Phosphaten sowie als an Fe- und Al-Oxide oder -Hydroxide sorbierte Phosphate vor. Die organischen phosphorhaltigen Bestandteile des Bodens entstammen abgestorbenen Organismen und setzen sich zum größten Teil aus den Salzen der Phytinsäure (Ca-, Mg-, Fe- und Al-Phytate), Nukleinsäuren, Phosphatiden sowie mit Humin- und Fulvosäuren komplexierten Fe- und Al-Phosphaten zusammen. Diese organischen Phosphate dissoziieren, wie auch die anorganischen Phosphate, und bilden Salze u. a. mit Al-, Fe- und Ca-Ionen. Durch die geringe Löslichkeit der P-Verbindungen liegt der P-Gehalt in der Bodenlösung nur selten höher als $3 \text{ mg l}^{-1} \text{ P}$. Diese Löslichkeit ist dabei stark abhängig vom pH-Wert des Bodens: Im sauren pH-Bereich fallen Fe- und Al-Phosphate, im neutralen bis alkalischen Bereich hingegen Ca-Phosphat aus. Die höchste Löslichkeit und damit die höchste Pflanzenverfügbarkeit von Phosphaten liegt bei einem pH-Wert von etwa 5,7 vor (ULLRICH-EBERIUS *et al.*, 1984). Die Löslichkeit der Phosphate nimmt mit sinkender P-Konzentration in der Bodenlösung zu, da die Prozesse der Adsorption und Desorption dynamische Gleichgewichtsreaktionen sind. Da diese Reaktionen jedoch sehr träge ablaufen, kann es zu Spitzenzeiten des P-Verbrauchs durch die Pflanzen dennoch zu einer Mangelsituation kommen. Pflanzen nehmen Phosphor als H_2PO_4^- und HPO_4^{2-} auf. Diese Phosphationen werden auch durch das Gefäßsystem der Pflanze zu den assimilierenden Organen transportiert, wo sie dem Aufbau von z. B. DNA oder ATP dienen (s. u.).

P-Verluste durch Auswaschung aus dem Boden treten aufgrund der geringen P-Gehalte in der Bodenlösung kaum auf. Bei sehr stark mit Phosphor versorgten Böden kann die Sorptionskapazität des Bodens, also freie Fe-, Al- und Ca-Oxid-Gruppen sowie -Hydroxid-Gruppen, nicht mehr ausreichend sein, so dass es zu Auswaschungsverlusten kommen kann. Weitere P-Verluste des Bodens sind durch Erosion sowie die Abfuhr des Erntegutes möglich.

In den Pflanzen macht Phosphor nur einen Anteil von 0,1 bis 0,5 % der Trockenmasse aus. Er kommt jedoch in zahlreichen wichtigen Verbindungen wie Nucleotiden und den Nucleinsäuren DNA und RNA als Träger der Erbinformation sowie in den Nucleosidphosphaten des Energiestoffwechsels ADP und ATP vor. Er ist an der Kohlenhydrat-, Fett- und Proteinbildung beteiligt und in Orthophosphorsäureestern von Zuckern, im Reservestoff Phytin, in Amylopektin sowie in Phosphatiden (Phospholipiden) enthalten. Eine Phosphordüngung kann die Reifeprozesse von Pflanzen beschleunigen, vorausgesetzt Kalium und Magnesium sind ebenfalls in ausreichender Menge vorhanden. Einen besonders hohen Phosphorbedarf haben junge, wachsende Pflanzen. Eine erhöhte P-Gabe vermehrt in den Pflanzen insbesondere die Fraktion der anorganischen Phosphate, welche in den Vakuolen gespeichert werden (SMITH, 1966, ULLRICH *et al.*, 1965). Von hier können sie bei Bedarf wieder mobilisiert werden. Im Samen wird außerdem vermehrt

der energiearme Reservestoff Phytin gebildet. Phosphor wird in der Pflanze zunächst in die jüngsten Organe transportiert. Der Weg erfolgt jedoch, anders als beim Stickstoff, auch umgekehrt zurück in ältere Blätter. Somit sind die Symptome von **P-Mangel** auch nicht ausschließlich an den älteren Blättern sichtbar. Durch die Sorptionsmechanismen im Boden tritt P-Mangel insbesondere auf stark sauren oder stark alkalischen Böden auf. Trotz der wichtigen Funktionen des Phosphors in den Pflanzen insbesondere im Energiestoffwechsel tritt bei einem Mangel nicht sofort der Zelltod ein, denn die Pflanzen haben durch Steigerung der Phosphataseaktivität die Möglichkeit, P-Ionen aus organischen Verbindungen zu mobilisieren, wodurch das Pflanzenwachstum jedoch eingestellt bzw. reduziert wird (BESFORD, 1979). Die wichtigsten Symptome eines P-Mangels sind Verringerungen von Blattoberfläche (FREDEEN *et al.*, 1989) und Anzahl der Blätter (LYNCH *et al.*, 1991). Weitere optisch erkennbare Folgen des P-Mangels sind Rotfärbungen durch Anthocyanbildung, welche durch die gehemmte Dunkelreaktion der CO₂-Assimilation hervorgerufen wird. Dieses P-Mangel-Symptom ist häufig an den schnell wachsenden jungen Maispflanzen erkennbar, da der P-Bedarf, wie bereits erwähnt, bei wachsenden, jungen Pflanzen besonders hoch ist. Weitere Symptome an den Pflanzen sind Zwergwuchs, stumpf blaugrüne Färbungen sowie Starrtracht, die durch gestörte Zellteilung bei weiterlaufender Chlorophyll- und Zellwandbildung auftreten (SCHILLING, 2000).

Ein **P-Überschuss** in Pflanzen kommt dagegen praktisch kaum vor, da die Phosphationen im Boden sehr gut sorbiert werden. Als Nebenerscheinung von P-Überschuss im Boden kann es für Pflanzen jedoch zu Zink- oder Eisenmangel in Folge der Festlegung dieser Elemente kommen.

Auf landwirtschaftlich genutzten Böden muss durch die Verluste der Ernteabfuhr regelmäßig eine **P-Düngung** durchgeführt werden. Die hierfür zur Verfügung stehenden mineralischen P-Dünger entstehen durch Behandlung von bergmännisch abgebautem Rohphosphat, welches zunächst nicht pflanzenverfügbar ist. Aus der Behandlung von Rohphosphat mit Schwefelsäure entsteht z. B. Superphosphat (mit 18 % P₂O₅), bei Verwendung von Phosphorsäure dagegen Triple-Superphosphat (mit 46 % P₂O₅). In beiden Produkten liegt das Phosphat mindestens zu 93 % wasserlöslich und somit pflanzenverfügbar vor. Weitere wichtige mineralische Phosphordünger sind Ammonphosphate, also NP-Dünger. Es wird zwischen Mono-Ammoniumphosphat (MAP) mit 12 % NH₄⁺ und 54 % P₂O₅ und Di-Ammoniumphosphat (DAP) mit 18 % NH₄⁺ und 46 % P₂O₅ unterschieden. Beide sind zu 90 % wasserlöslich (KNITTEL & ALBERT, 2003). Die Nutzung **organischer Dünger als P-Quellen** spielt jedoch eine zunehmend wichtige Rolle, da die Phosphat-Reserven endlich sind und eine Erschöpfung der Reserven in 100 bis 130 Jahren wahrscheinlich ist (CISSE & MRABET, 2004). Nach aktuellen Richtwerten der Landwirtschaftskammer sind in Rindergülle (von Milchvieh, Rindern, Bullen und Kälbern) zwischen 0,5 und 1,0 kg m⁻³ P enthalten und in Schweinegülle (von Mastschweinen, Sauen und Ferkeln) zwischen 0,5 und 1,7 kg m⁻³ P (LWK NRW, 2011). Phosphor liegt je nach Gülleart und Aufberei-

tungsform zu 15 bis 75 % organisch gebunden vor, dieser Anteil ist somit zunächst nicht pflanzenverfügbar. Es kann jedoch in der Regel längerfristig mit einer 100%igen Ausnutzung des Phosphors gerechnet werden (BEER & SUNTHEIM, 2003). Die mittleren P-Gehalte der Gärprodukte liegen zwischen 0,5 und 0,9 kg m⁻³ P (vgl. Kapitel 2.3.1).

2.5.4 Kalium

Kalium kommt in Pflanzen nicht in organischen Verbindungen, sondern in Form von freien Ionen vor. Es dient der Osmoregulation, dem Erhalt des elektrochemischen Gleichgewichtes in den Zellen und ihrer Kompartimente sowie der Regulierung der Enzymaktivitäten.

Wie Phosphor steht Kalium nicht im Austausch mit der Atmosphäre. Der landwirtschaftliche **Kaliumkreislauf** spielt sich im Wesentlichen zwischen Boden und Pflanzen ab. Da Kalium nur mit einem Anteil von < 0,1 % in organischen Verbindungen vorkommt, entspricht der Kaliumgehalt des Bodens praktisch dem an anorganischen Kalium. In Mineralböden kommt Kalium zu 0,2 bis 3 % vor. Bezogen auf eine Bodentiefe von 30 cm entspricht dies etwa 9.000 bis 14.000 kg ha⁻¹. In Moor- und Quarzsandböden sind die Gehalte etwas niedriger. Kalium kommt im Boden in drei unterschiedlich gut pflanzenverfügbaren Formen vor, die in einem Gleichgewicht zueinander stehen. Zum einen können K⁺-Ionen im Kristallgitter in Silicaten wie Kalifeldspäten und Glimmern sowie silicatischen Tonmineralen wie Illit und Vermikulit gebunden sein. Daneben kommen sie austauschbar gebunden vor oder befinden sich als K⁺-Ionen in der Bodenlösung, wo sie mit Gehalten zwischen 1 und 120 mg l⁻¹ vorkommen. Kalium macht in den Silicaten und Tonmineralen etwa 2 bis 5 % der Kationenaustauschkapazität aus. Bei Verbrauch von Kalium aus der Bodenlösung durch die Pflanzen können größere Mengen an Zwischenschicht-Kalium aus den Kristallgittern gelöst werden. Deshalb tritt bei ausbleibender Kalium-Düngung ein Mangel an den Pflanzen in der Regel erst nach etwa 15 bis 20 Jahren auf. Bei Kaliumdüngung werden die K⁺-Sorptionsstellen in den Kristallgittern wieder aufgefüllt und das Düngerkalium somit fixiert.

Mit **Kalium-Verlusten** ist aufgrund der beschriebenen Prozesse kaum zu rechnen. Bei sehr hohen K-Gaben können auf Sand- und schwach lehmigen Sandböden Auswaschungsverluste auftreten.

Pflanzen nehmen Kalium im Wesentlichen als K⁺-Ionen aus der Bodenlösung sowie aus dem austauschbar gebundenem K-Vorrat auf. Auch in der Pflanze wird Kalium als K⁺-Ion in Xylem und Phloem transportiert. Die Funktionen des Kaliums in der Pflanze sind ausschließlich an seine Ionenform gebunden. Über Pumpen oder Kanäle kann Kalium Membranen in der Pflanze leicht durchdringen. Hier wirkt es z. B. in ATP-angetriebenen Pumpen als Gegenspieler zu H⁺-Ionen, so auch bei der Regulierung der Stomata-Bewegungen. Auch der Turgor wird u. a. durch Kalium-Ionen reguliert, da sie in den Zellen die Funktion eines Osmotikums ausüben. Die CO₂-Assimilation wird über verschiedene Wege direkt oder indirekt durch die Anwesenheit von Kali-

um beeinflusst. Des Weiteren spielt Kalium eine wichtige Rolle bei der Aktivität vieler Enzyme, die entweder auf die Anwesenheit von Kalium angewiesen sind oder durch sie stimuliert werden.

Durch die Möglichkeit der Verlagerung des Kaliumions in der Pflanze findet bei **K-Mangel** ein Transport von den alten in die neueren Blätter statt. Deshalb werden Symptome bei Kaliummangel auch zuerst an den ältesten Blättern sichtbar. Diese äußern sich durch die Bildung von Chlorosen sowie Gelbfärbungen mit nachfolgender Bildung von Nekrosen, welche von den Spitzen und Blatträndern ausgehen. Ein weiteres Symptom ist, bedingt durch den gestörten Wasserhaushalt, Welketracht. Durch mangelnde Verholzung der Zellwände kann Lagerneigung sowie eine höhere Anfälligkeit gegen Pilzinfektionen auftreten.

Ein **Kalium-Überschuss** äußert sich demgegenüber in Form wenig spezifischer Salzschäden mit Blattrandnekrosen.

Auch wenn schwere Böden einige Jahre ohne Kaliumdüngung auskommen, sollte regelmäßig eine Ausgleichsdüngung stattfinden und die Gesamt-Kaliumbilanz im Auge behalten werden. Für eine Kalium-Düngung stehen **organische Dünger** wie Gülle oder Gärprodukte zur Verfügung. Die Kaliumgehalte von Rindergülle liegen zwischen 2,7 und 4,3 kg m⁻³ K, in Schweinegülle sind zwischen 1,7 und 3,7 kg m⁻³ K enthalten (LWK NRW, 2011). Die Kaliumgehalte in der Gülle haben jedoch durchschnittlich in den vergangenen Jahren abgenommen, vermutlich durch einen erhöhten Einsatz von Maissilage in der Futtermittelherstellung zulasten der Verfütterung von Grassilage (GOSCH, 2007). Gärprodukte enthalten im Mittel zwischen 2,6 und 4,2 kg m⁻³ K (vgl. Kapitel 2.3.1). **Mineralische Kaliumdünger** werden hauptsächlich als Kalirohsalze bergmännisch aus Lagerstätten abgebaut, wobei in der Natur Chloride und Sulfate von Kalium vorkommen. Die Rohsalze werden anschließend aufbereitet, z. B. mittels Heißlösung oder Flotation. Die verschiedenen Kalium-Dünger enthalten am Ende oft noch weitere Nährelemente. So enthält Korn-Kali neben 40 % K₂O auch Magnesium. Kaliumsulfat und Patentkali enthalten jeweils 18 % Schwefel, während Kali-Nitrat 13 % NO₃⁻-N enthält. 60er Kali ist demgegenüber relativ rein. Bei salzempfindlichen Sonderkulturen muss auf die Kaliform als Sulfat geachtet werden, da hohe Chlorid-Gehalte nicht toleriert werden (KNITTEL & ALBERT, 2003).

2.6 Wirkungen von Gärprodukten auf den Boden

Böden sind natürliche, komplexe Systeme, die sowohl für Ökosysteme als auch für den Menschen wichtige Funktionen haben. Sie dienen als Nutzfläche und geschichtliche Informationsspeicher, sie erfüllen aber auch natürliche Bodenfunktionen. Hierzu zählen die durch die Prozesse Speicherung, Filterung, Pufferung und Transformation erzielten Regelungsfunktionen sowie die Lebensraumfunktionen für Mikroorganismen, Pflanzen, Tiere und Menschen (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002). Im Zuge der landwirtschaftlichen Bodennutzung sollte

die Bodenstruktur, die biologische Aktivität sowie der standorttypische Humusgehalt des Bodens erhalten werden.

Da durch eine Düngieranwendung sowohl chemische als auch biologische Faktoren des Bodens beeinflusst werden können, müssen bei der Einführung und Verwendung von Gärprodukten als neuartige Dünger die Wirkungen auf verschiedene Bodenparameter untersucht werden. Die bisherigen Erkenntnisse zu den Wirkungen von Gärproduktanwendungen auf diese Parameter sollen im Folgenden betrachtet werden.

2.6.1 Pflanzennährelementgehalte und pH-Wert des Bodens

ODLARE *et al.* (2008) untersuchten die bodenchemischen Wirkungen einer 100 kg ha^{-1} N-Düngung mit Gärprodukten (aus der Vergärung von Bioabfall aus Haushalten und Großküchen) in einem vierjährigen Feldversuch mit Gerste und Hafer im Wechsel und verglichen diese mit der Wirkung anderer organischer Dünger. Die Bodenproben wurden jeweils vier Wochen nach der Ernte genommen und anschließend auf den pH-Wert und die Gehalte an C_{org} , N_{ges} , P_{ges} , S_{ges} , die verfügbaren Gehalte an P und K (P_{AL} , P_{Olsen} , K_{AL}) sowie auf verschiedene Schwermetalle untersucht. Insgesamt wurden im Mittel über die vier Jahre nur sehr wenige signifikante Unterschiede zur ungedüngten Kontrolle gefunden. Die Düngung mit dem Gärprodukt bewirkte eine signifikante Erhöhung des K_{AL} -Gehaltes im Boden von $18,4 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ TM}$ auf $20,1 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ TM}$. Einen ähnlichen Effekt hatten auch Schweinegülle, Rindergülle mit Mineraldünger sowie Kompost.

Im Rahmen eines Laborversuchs untersuchten ERNST *et al.* (2008) die Wirkungen von Rindergülle und Gärprodukten (aus der Vergärung von Rindergülle, Grassilage und Mais) auf bodenchemische Parameter. Die Dünger wurden mit einer $120 \text{ kg ha}^{-1} \text{ NH}_4^+\text{-N}$ entsprechenden Aufwandmenge auf den Boden appliziert, etwa 5 cm tief eingearbeitet und in 2-Liter-Behältern über sechs Wochen bei 15°C inkubiert. Bei der anschließenden Bodenanalyse wurde eine signifikante Erhöhung des pH-Wertes sowie des $\text{NH}_4^+\text{-N}$ -Gehaltes gegenüber der ungedüngten Kontrolle und der Güllevariante gefunden. Eine Zunahme gegenüber der Kontrolle zeigte sich auch für die Gehalte an organischem Kohlenstoff (TOC) und Gesamtstickstoff (N_{ges}), deren Unterschiede jedoch nicht statistisch gesichert waren. Da die Dünger mit gleichen Mengen an Ammoniumstickstoff appliziert wurden, schlossen die Autoren aus den höheren Gehalten in der Gärproduktvariante auf eine höhere Ammonifikationsrate im Boden nach Düngung mit Gärprodukten. Dies führten sie auf die Verschiebung der Mikroorganismenpopulation, möglicherweise durch das Einbringen von Mikroorganismen aus dem Fermentationsprozess, zurück.

LORIA *et al.* (2007) fanden in Freilandversuchen mit Schweinegülle und vergorener Schweinegülle heraus, dass bei beiden Düngern nach der Applikation der anfänglich hohe Ammoniumgehalt im Boden bereits nach wenigen Tagen sinkt und im Gegenzug der Nitratgehalt durch einen rasch ablaufenden Nitrifizierungsprozess ansteigt. Da Nitrat aufgrund der geringen Sorption im

Boden leicht in tiefere Bodenschichten oder das Grundwasser ausgewaschen werden kann, ist nach Meinung der Autoren die Gefahr von Stickstoffverlusten über diesen Austragsweg bei einer Düngung mit Gärprodukten trotz ihres hohen Ammoniumanteils am Gesamtstickstoff gegeben. Bei den beschriebenen Untersuchungsergebnissen muss beachtet werden, dass eine einmalige oder über wenige Jahre durchgeführte Düngung aufgrund der vielen im Boden ablaufenden chemischen und biologischen Umsetzungsprozesse nur selten einen deutlich erkennbaren Effekt auf die Werte bodenchemischer Parameter hat. Über einen solchen Zeitraum durchgeführte Versuche eignen sich lediglich zur Abschätzung von Tendenzen für die Entwicklung bodenchemischer Parameter, da sich ein chemisches Gleichgewicht oft erst nach einer regelmäßig über etwa zehn Jahre durchgeführten Düngung einstellt.

2.6.2 *Kohlenstoffhaushalt des Bodens und bodenmikrobiologische Parameter*

Der oTS-Gehalt sowie die Zusammensetzung der organischen Substanz eines Düngers bestimmen im Wesentlichen das C-Mineralisierungsverhalten im Boden und somit das Humusreproduktionsvermögen. Je stabiler die organische Substanz des Düngers ist, desto geringer ist die C-Mineralisierung durch Mikroorganismen bzw. die Bodenatmung und desto höher ist das Humusreproduktionsvermögen des Düngers. Die Aktivität der Bodenmikroorganismen ist stark abhängig vom Kohlenstoff- und Nährstoffhaushalt des Bodens. Als Maß für die mikrobielle Aktivität des Bodens kann die Bodenatmung genutzt werden, welche als Kohlenstoffdioxidabgabe bzw. Sauerstoffaufnahme des Bodens definiert ist. Vergleicht man die Atmung eines gedüngten Bodens mit der eines ungedüngten Kontrollbodens, so kann die Differenz auch als Maß für die C-Mineralisierung der organischen Düngersubstanz gesehen werden und es können Aussagen über die Stabilität der organischen Substanz des Düngers abgeleitet werden. Eine praxisnahe Methode zur Untersuchung der Humusreproduktionswirkung von Gärprodukten ist die Durchführung von Feldversuchen, in denen der Boden nach der Düngung auf seinen Humusgehalt untersucht wird. Aussagekräftige Ergebnisse erhält man jedoch nur durch langjährige Dauerfeldversuche, welche bisher zur Untersuchung der Humusreproduktionsleistung von Gärprodukten nicht durchgeführt wurden. Dagegen gibt es bereits verschiedene Untersuchungen zur **C-Mineralisierung von Gärprodukten im Boden** bzw. zur Bodenatmungsrate nach der Düngung mit Gärprodukten. Hierbei wird je nach Substrat, Temperatur und Inkubationszeit von C-Mineralisierungsraten von 12 bis 32 % (bzw. 55 % bei festem Gärprodukt) des mit dem Gärprodukt ausgebrachten Kohlenstoffs berichtet (MARCATO *et al.*, 2009; ASMUS *et al.*, 1988; DE NEVE *et al.*, 2003, SENSEL *et al.*, 2011).

Wird die C-Mineralisierung des Gärproduktes mit der des Ausgangssubstrates verglichen, was insbesondere für das Substrat Gülle gemacht wurde, wird häufig eine reduzierte C-Mineralisierungsrate im Boden festgestellt. Dies lässt sich durch eine Erhöhung der stabilen

Anteile der organischen Substanz erklären. Diese ist wiederum Folge einer Reduktion der leicht abbaubaren C-Verbindungen im Fermentationsprozess (vgl. Kapitel 2.3.1).

So bestimmten ASMUS *et al.* (1988) die Humusreproduktionsleistung von ausgefauler Schweinegülle im Vergleich zu frischer Schweinegülle und Schweinemist in Mitscherlich-Gefäßen. Boden wurde mit verschiedenen Substraten mit jeweils gleicher C-Menge vermischt und in 14-tägigen Abständen auf den C-Gehalt untersucht. Nach 24 Wochen war die frische Schweinegülle zu 49 % mineralisiert, der Schweinemist zu 40 % und die ausgefaule Schweinegülle nur zu 32 %. Dies spricht für eine höhere Stabilität der vergorenen Substanz und somit für eine höhere Humusreproduktionsleistung der vorhandenen organischen Substanz. Des Weiteren bestimmten die Autoren die Abbauraten der einzelnen Bestandteile der organischen Substanz von Schweinegülle im Biogasprozess. Dabei wurde Lignin zu 0 %, Cellulose zu 40 % und Hemicellulose zu über 80 % abgebaut. Die Abbauraten für flüchtige Fettsäuren betrugen > 90 % und für Eiweiße 50 %. Da Lignin im Gegensatz zu Cellulose und Hemicellulose für Mikroorganismen schwer abbaubar ist, erklärt dies die höhere Stabilität der organischen Substanz des Gärproduktes im Vergleich zum Ausgangssubstrat.

Auch REINHOLD *et al.* (1991) untersuchten die Veränderungen in der Kohlenstoffdynamik von Mischgülle und ausgefauler Gülle durch Bebrütungsversuche über 35 Tage bei 25 °C. Sie kamen ebenfalls zu dem Ergebnis, dass durch die Bebrütung bei frischer Gülle deutlich mehr Kohlenstoff frei wird als bei ausgefauler Gülle. Berechnungen ergaben, dass die bei Bebrütung der Gülle freigesetzte C-Menge fast genau derjenigen Menge entsprach, die während des Biogasprozesses und während der Bebrütung aus dem Biogassubstrat freigesetzt wurde. Die zur Humusreproduktion zur Verfügung stehende C-Menge, also die verbleibende C-Menge nach der Bebrütung, war somit für beide Güllearten etwa gleich. Die Autoren kamen zu dem Schluss, dass die in Gärprodukten enthaltene organische Substanz in höherem Maße für die Humusreproduktion wirksam ist als die organische Substanz in Rohgülle.

Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen MARCATO *et al.* (2009) bei der Untersuchung der CO₂-Freisetzung von in Boden eingemischter getrockneter Schweinegülle bzw. Gärprodukten aus Schweinegülle in einem Inkubationsversuch. Die Boden-Dünger-Gemische wurden zusammen mit einer NaOH-Lösung als CO₂-Falle in größere, luftdicht verschlossene Gefäße gegeben. Die CO₂-Freisetzung wurde durch regelmäßige Titration der NaOH-Lösung bestimmt. Der Anteil des zu CO₂ mineralisierten Kohlenstoffs am applizierten organischen Kohlenstoff betrug nach 49 Tagen bei Schweinegülle 17,6 %, bei fermentierter Schweinegülle dagegen nur 12,0 %. Dies führten die Autoren auf eine erhöhte Stabilisierung der organischen Substanz durch den Fermentationsprozess zurück. Das Ergebnis konnte durch eine ermittelte relative Zunahme der stabilen Bestandteile der organischen Substanz Lignin und Hemicellulose bestätigt werden.

Ähnliche Versuchsansätze wie die zuvor angeführten werden zur Bestimmung der Wirkungen von organischen Düngern auf die **Aktivität von Mikroorganismen im Boden** verwendet. Ne-

ben Methoden zur Bestimmung der Bodenatmung kommen noch weitere Methoden wie die Messung der substratinduzierten Respiration zur Quantifizierung der mikrobiellen Biomasse (C_{mic}), Untersuchungen der Enzymaktivitäten und die Bestimmung des Adenylat-Gehaltes zum Einsatz. Die Wirkungen einer Gärproduktausbringung auf diese Parameter wurden sowohl im Labor als auch in praxisnahen Feldversuchen untersucht.

So untersuchten ODLARE *et al.* (2008) im Rahmen von vierjährigen Feldversuchen mit Hafer und Gerste den Einfluss einer 100 kg ha^{-1} N-Düngung mit Gärprodukten (vergorener Haushalts- und Großküchenbioabfall) und anderen organischen Düngern auf verschiedene bodenbiologische Parameter vier Wochen nach der Ernte. Die Bodenatmung, gemessen über die elektrische Leitfähigkeit einer KOH-Lauge mittels eines Respirometers, zeigte bei keiner Variante einen Unterschied zur ungedüngten Kontrolle. Dies führten die Autoren darauf zurück, dass leicht umsetzbare Nährstoffe für die Mikroorganismen im Herbst aufgebraucht sind und sowohl Pflanzen als auch Mikroorganismenpopulationen zu diesem Zeitpunkt nicht mehr aktiv wachsen. Demgegenüber nahmen aber die mikrobielle Biomasse und somit auch der Anteil nicht wachsender, dormanter Mikroorganismen durch die Düngung mit Gärprodukten signifikant gegenüber der Kontrolle zu. Die Messung der Biomasse erfolgte über die substratinduzierte Respiration durch Zufuhr leicht umsetzbarer Kohlenhydrate zur Bodenprobe und Messung der Bodenatmung über einen kurzen, definierten Zeitraum. Auch Stickstoffmineralisierung und potenzielle Ammonium-Oxidation nahmen nachweisbar zu. Die Autoren folgerten daraus, dass Gärprodukte die bodenbiologische Aktivität unterstützen und insgesamt einen förderlichen Einfluss auf die Bodenqualität haben. Grund sind ihre, im Vergleich zu den anderen getesteten organischen Düngern Kompost, Klärschlamm, Rinder- und Schweinegülle, höheren Gehalte an mineralischem Stickstoff und leicht umsetzbarem Kohlenstoff.

Eine signifikant erhöhte Bodenatmung sechs Wochen nach Düngung mit Gärprodukten fanden dagegen ERNST *et al.* (2008), die ebenfalls Wirkungen einer Gärproduktdüngung auf verschiedene bodenbiologische Parameter untersuchten. In einem Laborversuch mit 2-Liter-Behältern wurde die Wirkung einer Düngung mit $120 \text{ kg ha}^{-1} \text{ NH}_4^+\text{-N}$ aus Gärprodukten (aus der Vergärung von Rindergülle, Grassilage und Mais) bzw. aus Rindergülle auf die Bodenatmung, die mikrobielle Biomasse sowie den metabolischen Quotienten getestet. Die Bodenatmung wurde über Konzentrationsänderungen des CO_2 von durch die Bodenproben geleiteter Luft mittels Heinemeyer-Anlage gemessen. Die mikrobielle Biomasse wurde mit der Chloroform-Fumigations-Extraktions-Methode bestimmt. Sie ermittelten eine höhere mikrobielle Biomasse (C_{mic} und N_{mic}) im mit Gärprodukten gedüngten Boden sowie eine signifikant erhöhte Bodenatmung gegenüber der Kontrolle. Insbesondere die mikrobielle Biomasse nahm durch die Düngung mit Gülle deutlich stärker zu als durch die Düngung mit Gärprodukten. Das begründeten die Autoren damit, dass Gärprodukte weniger leicht verfügbaren Kohlenstoff enthalten als Gülle und somit die mikrobielle Aktivität durch Düngung mit Gülle stärker gefördert wird.

In einem Feldversuch mit den Varianten Brache und Gerste untersuchten TERHOEVEN-URSELMANS *et al.* (2009) die Wirkungen einer Düngung mit Gärprodukten (aus der Vergärung von Rinder- und Schweinemist) im Vergleich zu einer ungedüngten Kontrolle. Als Parameter wurden dazu die Bodenatmung, welche nur in der Brachevariante gemessen wurde, sowie der Adenylatgehalt des Bodens als Maß für die mikrobielle Biomasse herangezogen. Die Bodenatmung wurde mittels Infrarot-Gasanalysator direkt im Feld gemessen und war in der Gärproduktvariante signifikant höher als in der ungedüngten Kontrolle. Aus den Messergebnissen wurde über ein Modell die insgesamt freigesetzte Kohlenstoffmenge je Hektar über den Zeitraum von Ende April bis Mitte Juni abgeschätzt. Dabei war die C-Freisetzung mit 1.250 kg in der gedüngten Variante signifikant höher als in der ungedüngten Variante mit 1.050 kg C. Auch die Mitte Juli zur Ernte bestimmten ATP-Gehalte des Bodens bis 10 cm Tiefe waren in den mit Gärprodukten behandelten Böden jeweils höher als in den zugehörigen Kontrollböden. Mit 27 % höherem ATP-Gehalt in der gedüngten Variante war der Unterschied jedoch nur in der Brachevariante signifikant. Die Autoren begründeten den geringeren Unterschied zwischen Gärprodukt- und Kontrollvariante im mit Gerste bewachsenen Boden damit, dass die Pflanzen durch Rhizodeposition und Eintrag von Kohlenstoff in den Boden selbst bereits einen positiven Effekt auf die Aktivität der Mikroorganismen hätten, welcher sich mit dem der Gärprodukte überlagerte.

KAUTZ & RAUBER (2007) untersuchten die Wirkungen einer Düngung mit zwei unterschiedlichen Gärprodukten (aus der Vergärung von überwiegend Schweinegülle bzw. aus überwiegend nachwachsenden Rohstoffen) auf die Enzymaktivitäten im Boden als Maß für die mikrobielle Aktivität. Sie fanden zu verschiedenen Terminen im Sommer eine Erhöhung der Dehydrogenaseaktivität des Bodens, jedoch nicht der β -Glucosidaseaktivität. Sie schlussfolgerten, dass der positive Effekt nicht allein auf die Zufuhr einer C-Quelle zurückzuführen sei, sondern insgesamt auf eine Verbesserung des Nahrungsangebotes. Die Autoren kamen zu der Einschätzung, dass Gärprodukte durch die Verbesserung der bodenmikrobiologischen Aktivität einen Beitrag zur Förderung der Bodenfruchtbarkeit leisten könnten.

2.6.3 Bodenmakrofauna

Untersuchungen zur Bodenmakrofauna beziehen sich im Wesentlichen auf Regenwürmer. Diese haben einen entscheidenden Einfluss auf die Fruchtbarkeit von Böden. Die von ihnen verursachten Gänge und Röhren tragen als Grobporen des Bodens zur Stabilisierung des Wasserhaushaltes sowie zur besseren Durchlüftung bei und ermöglichen es Pflanzenwurzeln, in tiefere Bodenschichten vorzudringen (HENSEN, 1877; GRAFF, 1983). Durch die Aufnahme von organischem Material und Bodenpartikeln entstehen im Verdauungstrakt der Regenwürmer stabile Ton-Humus-Komplexe, in denen Pflanzennährstoffe konzentriert sind (GRAFF, 1983) und die einen positiven Einfluss auf das Bodengefüge (LARINK, 1991) sowie auf die mikrobielle Aktivität

des Bodens haben (SCHEU, 1987). Regenwürmer reagieren sensitiv auf verschiedene Umweltfaktoren, deren Veränderungen somit einen Einfluss auf Abundanz, Biomasse oder das Artenspektrum der Regenwürmer haben können. Dazu gehören auch landwirtschaftliche Bewirtschaftungsmaßnahmen, die sich positiv oder negativ auf deren Populationsentwicklung auswirken können.

So ist z. B. die Zufuhr von organischer Substanz einer der wichtigsten Faktoren, welche die Abundanz von Regenwürmern positiv beeinflussen (EDWARDS & BOHLEN, 1996). Andererseits können Dünger auch Substanzen enthalten, die einen negativen Effekt auf Regenwürmer haben. Über Wirkungen von Düngung mit Gärprodukten auf Regenwürmer ist bisher wenig bekannt. Viele Untersuchungen sind dagegen zur **Wirkung von unfermentierter Gülle verschiedener Tierarten auf Regenwürmer** gemacht worden. Einige Autoren berichten von positiven Effekten durch Gülle oder andere organische Dünger auf Abundanz und Biomasse von Regenwürmern auf Grünland- und Ackerstandorten (LEROY *et al.*, 2007; EDWARDS & LOFTY, 1982; UNWIN & LEWIS, 1986). Bei sehr hohen Aufwandmengen kann es jedoch auch zu negativen Wirkungen kommen. Dies belegen Beobachtungen zu Austreibungseffekten direkt nach der Gülleausbringung (EDWARDS & LOFTY, 1982) oder zu über längere Zeiträume verminderten Abundanzen (CURRY, 1976; COTTON & CURRY, 1980). Es wurden sogar kurzzeitige toxische Effekte direkt nach der Applikation, die als 'initial setback' bezeichnet werden, beobachtet. Diese wurden auf toxische Wirkungen der Substanzen Benzoesäure, Ammoniumcarbonat und Natriumsulfid zurückgeführt (CURRY, 1976).

Die **Wirkung von Gärprodukten**, Gärproduktfraktionen aus der Separierung sowie Schweinegülle auf *Lumbricus terrestris* untersuchten BRAUCKMANN & BROLL (2007) in einem Bodensäulenversuch. Negative Effekte, wie eine Austreibung der Würmer aus dem Boden bei der Düngerausbringung oder Mortalität, wurden nicht beobachtet. Dagegen führte die Düngung mit Gärprodukten sowie mit Gärproduktfraktionen innerhalb von sieben Wochen zu höheren Biomassezunahmen der Würmer als eine Düngung mit Schweinegülle.

Auch ERNST *et al.* (2008) fanden in einem Laborversuch mit 2-Liter-Behältern nach sechs Wochen zum Teil deutliche Gewichtszunahmen von Regenwürmern der Arten *L. terrestris* und *Aporrectodea longa* nach Düngung mit Gärprodukten und Rindergülle. Demgegenüber war ein Gewichtsverlust für die Art *A. caliginosa* zu verzeichnen, der bei Düngung mit Gärprodukten größer als bei der mit Gülle war. Diesen Unterschied begründeten die Autoren mit geringeren Gehalten an leicht verfügbaren Nährelementen in den Gärprodukten, verbunden mit dem Fressverhalten von *A. caliginosa*. Diese Art ernährt sich geophag (LEE, 1985; CURRY & SCHMIDT, 2007), das heißt die Würmer nehmen vor allem leicht verfügbaren Kohlenstoff aus dem mineralischen Boden und der Bodenlösung auf. Da sein Anteil jedoch im Gärprodukt relativ gering war, vermuteten die Autoren eine Mangelernährung von *A. caliginosa*.

BERMEJO *et al.* (2010) untersuchten die Wirkung einer Düngung von $120 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ aus zwei verschiedenen Gärprodukten (aus der Nassfermentation von Mais und Rindergülle bzw. aus der Trockenfermentation von Mais), Stallmist und Rindergülle auf die Abundanz, Masse und Artenverteilung von Regenwürmern. Einen Monat nach der Düngerausbringung lagen die Abundanzen in allen gedüngten Varianten über der in der ungedüngten Kontrollvariante. Die höchste Steigerung um 128 % konnte in der mit Stallmist gedüngten Variante gefunden werden gefolgt von Gülle mit einer Zunahme der Abundanz um 103 %. Durch das Gärprodukt aus der Trockenfermentation wurde die Abundanz um 66 % gesteigert, das aus der Nassfermentation erzielte eine Zunahme der Abundanz um 52 % gegenüber der Kontrollvariante. Die Unterschiede zur Kontrolle waren jeweils nicht signifikant. Die Autoren erklären den positiven Effekt des Stallmists mit dem hohen C/N-Verhältnis in diesem Dünger. Die geringere Abundanz in den mit Gärprodukten gedüngten Parzellen wird ebenfalls mit der schlechteren Verfügbarkeit des Kohlenstoffs in diesen Düngern begründet. Weitere mögliche Gründe für den weniger positiven Effekt der Gärprodukte gegenüber den anderen organischen Düngern werden in dem hohen pH-Wert sowie den hohen Anteilen an NH_4^+ -N an N_{ges} gesehen.

2.7 Wirkungen von Gärprodukten auf Pflanzen

Bei der Verwendung der Gärprodukte als Dünger im Pflanzenbau ist eine Kenntnis darüber, wie viel des enthaltenen Stickstoffs für die Pflanzen im Anwendungsjahr bzw. in den Folgejahren verfügbar wird, für eine solide Ertragsprognose unabdingbar. Am besten untersucht ist die Ertragswirkung von Gärprodukten, da dieser Fragestellung in der Praxis die größte Bedeutung beigemessen wird. Zur Optimierung der Düngestrategie ist aber auch wichtig, die zeitliche Verfügbarkeit der Nährelemente zu kennen, da das Wachstum und die Entwicklung, die Erträge sowie die Qualität der Ernteprodukte maßgeblich davon beeinflusst werden. Da die Erträge nur bedingt Rückschlüsse darauf zulassen, soll im Folgenden auch auf Untersuchungen zum Wachstum der Pflanzen, ihren N-Versorgungsstatus sowie die Qualität der Ernteprodukte eingegangen werden.

2.7.1 Wachstum und N-Versorgungsstatus

Zu den Wirkungen von Gärprodukten auf Wachstum und N-Versorgungsstatus von Nutzpflanzen im zeitlichen Verlauf sind in der Literatur bisher nur wenige Berichte zu finden.

GARG *et al.* (2005) untersuchten die Wirkungen von Gärprodukten (aus der Vergärung von Rindermist) im Vergleich zu Flugasche in jeweils einer hohen und einer niedrigen Aufwandmenge auf Weizen und dokumentierten den Entwicklungsverlauf der Bestände durch die Messung des Blattflächenindex. Eine deutliche Zunahme des Blattflächenindex konnte bei allen Varianten erst 60 Tage nach der Aussaat beobachtet werden. Die mit der hohen Aufwandmenge Gärprodukt

gedüngten Bestände wiesen durchgehend den höchsten Blattflächenindex auf. Das zweitgrößte Maximum erreichte die mit der geringen Aufwandmenge Gärprodukt gedüngte Variante. Beide Varianten erreichten ihren maximalen Blattflächenindex etwa neun Tage später als die Kontrollvariante und die mit Flugasche gedüngten Pflanzen, woraus auf eine länger andauernde Verfügbarkeit der Nährelemente aus den Gärprodukten geschlossen wurde.

Alternativ zu den Messungen des Wachstums können auch die tatsächlichen Erträge zu verschiedenen Zeitpunkten durch Zwischenernten bestimmt werden. Dafür ist die Ernte von Gräsern bzw. Grünland zu verschiedenen Schnitzeitpunkten am besten geeignet. GUNNARSSON *et al.* (2010) verglichen nach dieser Methode die Wirkung eines Gärproduktes im Vergleich zu einem mineralischen nitrathaltigen Dünger in einem Gefäßversuch mit einjährigem Weidelgras (*Lolium multiflorum* Lam.). Untersucht wurde die Wirkung des Gärproduktes (aus der Vergärung von Klee, Klee-Gras-Gemisch und Zuckerrübenblättern) u. a. auf die Trockenmasse sowie den N-Entzug der oberirdischen Biomasse jeweils 40, 81, 136 und 172 Tage nach der Aussaat sowie auf Trockenmasse und N-Entzug von Blättern, Stoppeln und Wurzeln nach 172 Tagen. Die Düngung erfolgte auf mineralischen Stickstoff bezogen bei beiden Düngern gleich in zwei Aufwandmengen. Zum ersten Erntetermin wurde bei der mineralisch gedüngten Variante noch eine höhere Trockenmasse geerntet und ein höherer N-Entzug festgestellt. Bei den drei folgenden Terminen waren demgegenüber die Erntemengen und N-Entzüge bei der Gärprodukt-Variante gleich hoch oder höher. Nach 172 Tagen gab es in der Summe aller vier Aufwüchse keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Varianten. Da in der mit Gärprodukt gedüngten Variante mehr Wurzelbiomasse gebildet wurde, war die Gesamtbiomasse, bestehend aus Blättern, Stoppeln und Wurzeln, nach 172 Tagen signifikant höher als in der mineralisch gedüngten Variante. Die N-Aufnahme über den gesamten Zeitraum unterschied sich bei beiden Düngern nicht. Es wurde geschlussfolgert, dass beide Düngerformen etwa gleich wirksam waren. Die langsamere Wirkung bis zum ersten Erntetermin des ammoniumhaltigen Gärproduktes erklären die Autoren damit, dass das Ammonium zunächst zu Nitrat umgewandelt werden muss um pflanzenverfügbar zu werden, was in der Regel innerhalb von 25 bis 35 Tagen geschieht. Außer dem Ammonium-Stickstoff wurden aus dem organisch gebundenem Stickstoff des Gärproduktes, welcher etwa 50 % ausmachte, zusätzlich 12 % N mineralisiert.

Die Wirkung verschiedener Gärproduktgaben auf das Wachstum, den Stängeldurchmesser, die Blattzahl, den Blattflächenindex und den Ertrag von Mais wurde von ISLAM *et al.* (2010) untersucht. Sie verglichen die Aufwandmengen 60, 70 und 82 kg ha⁻¹ N_{min} aus Gärprodukt mit einer ungedüngten Kontrolle. Die Höhe der Maispflanzen und ihr Stängeldurchmesser wurden an vier Terminen erfasst. In der Variante mit der Aufwandmenge 70 kg ha⁻¹ N_{min} wurden an allen Terminen die höchsten Pflanzen sowie die größten Stängeldurchmesser gemessen. Die hohe Aufwandmenge von 82 kg ha⁻¹ N_{min} erbrachte durchgehend geringere Werte, die oft sogar unter denen der Aufwandmenge 60 kg ha⁻¹ N_{min} lagen. Die Blattzahl, der Blattflächenindex sowie die

Biomasse wurden einmalig zum Ende des Versuchs bestimmt. In der Anzahl der Blätter je Pflanze bestanden keine signifikanten Unterschiede. Für den Blattflächenindex sowie den Ertrag wurden wie bei der Höhe und dem Stängeldurchmesser die höchsten Werte für die $70 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}_{\min}$ -Variante gefunden. Die Autoren schlossen daraus, dass die optimale Aufwandmenge für die Düngung von Mais bei $70 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}_{\min}$ liegt und eine Düngung von $82 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}_{\min}$ bereits zu hoch ist.

2.7.2 Erträge verschiedener Kulturpflanzen

Bevor auf die Wirkung von Gärprodukten auf die Erträge von Kulturpflanzen eingegangen wird, soll zunächst ein kurzer Exkurs zum Thema „**Mineraldüngeräquivalent**“ (**MDÄ**) gemacht werden, da dieses ein im Zusammenhang mit der Bewertung der Düngewirkung organischer Dünger häufig verwendeter Begriff ist. Das MDÄ soll allgemein eine Aussage darüber liefern, wie gut ein organischer Dünger im Vergleich zu einem mineralischen Dünger wirkt. Eine Definition des MDÄ wurde 1975 von KORIATH *et al.* eingeführt. Nach den Autoren bezieht sich ein Mineraldüngeräquivalent auf die Wirkung zur gedüngten Frucht und auf ein normales bzw. optimales Düngungsniveau. Ein MDÄ für Gülle gibt nach Definition der Autoren an, *„welcher Menge an Mineraldünger des gleichen Nährstoffes die mit der Gülle ausgebrachten Nährstoffe äquivalent sind, d. h. mit welcher Menge an Mineraldüngern derselbe Ertrag wie mit dem Nährstoff der Gülle erzielt wird. Mineraldüngeräquivalente werden auf die Wirkung der zum optimalen Zeitpunkt angewendeten und der allgemein gebräuchlichen Mineraldünger bezogen.“* Die Autoren unterscheiden zwischen dem MDÄ und der Nährstoffausnutzung, welche nicht aus der Wirkung auf den Ertrag, sondern aus der Nährstoffaufnahme aus den Düngemitteln abgeleitet wird und auch langjährige Nachwirkungen mit einschließen. Eine andere Definition legte SCHILLING (2000) vor. Nach ihm ist ein MDÄ die *„Menge an Nährelement in kg als Mineraldünger, welche bei Ausbringung zum optimalen Zeitpunkt die gleiche Düngewirkung bringt wie 100 kg Nährelement aus dem organischen Dünger“*. Unter Düngewirkung versteht er die an die Pflanze gelieferte Nährstoffmenge. Häufig wird der Begriff Mineraldüngeräquivalent von deutschen Autoren benutzt, ohne dass angegeben wird, wie dieses berechnet wurde. Dies erschwert die Vergleichbarkeit der Ergebnisse insbesondere dann, wenn die Einzelerträge nicht genannt werden.

Für die **Wirkung organischer Dünger auf die Erträge von Kulturpflanzen** gilt im Allgemeinen, dass stark humuszehrende Fruchtarten wie Hackfrüchte oder Mais positiv im Sinne einer Ertragssteigerung auf eine organische Düngung reagieren. Intensive Bodenbearbeitung führt zu starker Bodendurchlüftung und damit zu Humuszehrung und erhöhtem C-Bedarf. Außerdem profitieren Pflanzen mit einer spät einsetzenden und lang andauernden Wachstumsphase von der langsamen und anhaltenden Nährelementnachlieferung durch organische Dünger, da die Pflanzen damit optimal versorgt werden können. Wegen der Gefahr von Stickstoffverlusten soll-

ten organische Dünger nicht zu früh, zur Vermeidung von Abreifeverzögerungen aber auch nicht zu spät eingesetzt werden. Ideal ist die Gabe kurz vor der Aussaat oder nach dem Auflaufen der Maispflanzen. Getreidebestände reagieren weniger positiv auf organische Dünger, insbesondere auf feste Düngestoffe. Eine Güllegabe als Kopfdünger im Frühjahr, z. B. zu Winterweizen oder Wintergerste, ist üblich, eine mineralische Düngung als Startergabe zur schnelleren Wirkung kann jedoch notwendig sein (SCHILLING, 2000; KNITTEL & ALBERT, 2003).

Die **Wirkungen einer Düngung mit Gärprodukten auf die Erträge verschiedener Kulturpflanzen** variiert in den vorhandenen Veröffentlichungen stark, da sie neben der Zusammensetzung der Gärprodukte noch von vielen weiteren Faktoren wie z. B. Pflanzenart und -sorte, Bodencharakteristika, klimatischen Bedingungen und Ausbringzeitpunkten abhängt. In den meisten Fällen konnten durch die Düngung mit Gärprodukten Ertragssteigerungen nachgewiesen werden, die jedoch zum Teil deutlich geringer als in einer mit gleicher N-Aufwandmenge mineralisch gedüngten Variante waren. So ermittelten etwa SVENSSON *et al.* (2004) durch Düngung mit $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ aus Gärprodukten (aus der Vergärung von Bioabfall aus Haushalten und Großküchen) in einem vierjährigen Feldversuch mit Gerste und Hafer im Wechsel Ertragssteigerungen zwischen ca. 27 und 171 % gegenüber der ungedüngten Kontrolle. Dabei waren die Erträge in zwei von vier Jahren nicht signifikant niedriger als in den mineralisch gedüngten Varianten, jedoch nur in einem Jahr war der Ertrag signifikant höher als in der ungedüngten Kontrollvariante. Deutlich besser schnitten demgegenüber die Varianten ab, die mit jeweils $50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ aus Gärprodukten und N-Mineraldünger behandelt wurden. Hier wurden Ertragssteigerungen zwischen ca. 52 und 214 % erzielt, wobei der Mehrertrag gegenüber der ungedüngten Kontrollvariante in allen Jahren sowie der Minderertrag gegenüber der rein mineralisch gedüngten Variante in keinem Jahr signifikant waren. Bei Gerste war der Effekt durch Düngung mit Gärprodukten stärker als bei Hafer. Die Autoren folgerten, dass Gärprodukte durch den hohen NH_4^+ -N-Anteil am N_{ges} von 61 % zur Düngung von Kulturen mit einer kurzen und intensiven N-Aufnahmephase, wie sie für Gerste zutrifft, gut geeignet sind. Hafer weist demgegenüber eine länger andauernde N-Bedarfsphase auf.

TERHOEVEN-URSELMANS *et al.* (2009) untersuchten die Wirkung einer Düngung mit $66 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ aus Gärprodukten (aus der Vergärung von Rinder- und Schweinegülle mit Stroh) auf den Ertrag von Sommergerste. Der Ertrag wurde an drei verschiedenen Terminen bestimmt: zu Beginn des Ährenschiebens (BBCH 50), zur Milchreife (BBCH 75) sowie zur Totreife (BBCH 92). Die Autoren fanden eine signifikante durchschnittliche Ertragssteigerung um 22 % gegenüber der ungedüngten Kontrolle.

In den im vorigen Kapitel genannten Untersuchungen von GARG *et al.* (2005) wurde auch die Wirkung der Gärprodukte auf den Weizenertrag untersucht. Sie verglichen dabei die Aufwandmengen $4,5$ und $10,0 \text{ t ha}^{-1}$ Gärprodukte mit einer ungedüngten Kontrolle. Die hohe Aufwandmenge erzielte mit $6,2 \text{ t ha}^{-1}$ den signifikant höchsten Kornertrag. Das entsprach einer Steige-

runge um 41 % gegenüber der ungedüngten Kontrolle. Die geringere Aufwandmenge erreichte mit $5,2 \text{ t ha}^{-1}$ Korntrag eine Ertragssteigerung um 18 % gegenüber der ungedüngten Kontrolle, in welcher $4,4 \text{ t ha}^{-1}$ Weizen geerntet wurden. Die Gründe für die verbesserte Ertragswirkung lagen nach Ansicht der Autoren nicht nur in der Nährstoffzufuhr, sondern auch in verbesserten bodenphysikalischen Eigenschaften wie einer reduzierten Bodendichte und einer erhöhten gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit und Wasserhaltekapazität, die ebenfalls untersucht wurden. BRENNER (2008) untersuchte die Düngewirkung von vier Gärprodukten (aus der Vergärung von verschiedenen Energiepflanzen und Abfallsubstraten zusammen mit Schweinegülle (GR1), Rindergülle (GR2 und 3) sowie Mischgülle (GR4)) im Vergleich zu Schweinerohgülle. Am Standort 1 wurde ein einjähriger Versuch mit Wintergerste durchgeführt, am Standort 2 ein zweijähriger Versuch in den Jahren 2003 und 2004 mit Wintergerste und Winterweizen. Im einjährigen Versuch wurde eine geringe Aufwandmenge von $60 \text{ kg ha}^{-1} \text{ NH}_4^+\text{-N}$ ausgebracht. Dies führte zusammen mit einem hohen N_{min} -Gehalt des Bodens zu geringen Ertragsunterschieden. Die Kornträge lagen bei $7,9 \text{ t ha}^{-1}$ bei der ungedüngten Kontrolle und bei $8,9 \text{ t ha}^{-1}$ bei Düngung mit Schweinerohgülle. In den mit Gärprodukten gedüngten Varianten wurden etwas höhere Erträge von etwa $9,7 \text{ t ha}^{-1}$ erreicht. Die Erträge der gedüngten Varianten unterschieden sich nicht voneinander, lagen aber signifikant über der Kontrolle. Am zweiten Standort wurde die Düngung auf drei Gaben verteilt ($60, 60$ und $40 \text{ kg ha}^{-1} \text{ NH}_4\text{-N}$). Die Kontrollvariante erreichte einen Gerstenkorntrag von ca. 5 t ha^{-1} , die mit Rindergülle gedüngte Variante von ca. $8,5 \text{ t ha}^{-1}$ und die Gärprodukt-Varianten Erträge zwischen $7,9$ und $9,2 \text{ t ha}^{-1}$. Die gedüngten Varianten erreichten somit signifikant höhere Erträge als die Kontrollvariante, der Ertrag der Variante mit GR1 lag signifikant über dem der mit GR2 gedüngten Variante. Ähnliche Erträge wurden im Nachfolgejahr 2004 in Winterweizen erzielt. Eine mögliche Erklärung fand die Autorin in der höheren N_{ges} -Menge, die in der Variante GR1 aufgrund des geringen $\text{NH}_4^+\text{-N}$ -Gehaltes von nur 50 % ausgebracht wurde. In den Versuchen konnten keine Unterschiede zwischen den Ertragswirkungen von Gärprodukten und Rohgülle festgestellt werden.

Den Einfluss einer Düngung mit verschiedenen Gärprodukten auf Mais und Wintergerste untersuchte EILER (2008) in zweijährigen Versuchen. Zum Vergleich wurden Mineraldünger und Schweinegülle verwendet. Eine N-Aufwandmenge von $120 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ wurde zur Gerste als Kopfdüngung und zum Mais unmittelbar vor der Bestellung in die Pflugfurche gegeben. Im Durchschnitt der Jahre und der Gärprodukte wurden für Mais höhere MDÄ gefunden als für Gerste. Die Düngung mit Schweinegülle erzielte in der Wintergerste ein MDÄ von 57, im Mais von 75. Das Gärprodukt erbrachte mit Werten von 50 bei Wintergerste und 77 bei Mais ähnlich hohe MDÄ. Der Autor begründet diese Ergebnisse mit einer besseren Ausnutzung des organischen Stickstoffs durch die längere Vegetationszeit von Mais. Bei Gerste stieg der Ertrag mit steigendem Ammoniumgehalt bzw. abnehmender Trockensubstanz des Gärproduktes. Der Autor folgerte, dass die N-Ausnutzung von Gärprodukten mit MDÄ zwischen 50 und 80 mit der von

Schweinegülle vergleichbar sei, Phosphor und Kalium könnten demgegenüber zu 100 % angerechnet werden.

LORIA *et al.* (2007) untersuchten die Wirkung von Gärprodukten (aus der Vergärung von Schweinegülle) im Vergleich zu Schweinegülle und Mineraldünger bzw. mit einer zusätzlichen N-Steigerung durch Mineraldünger auf den Ertrag von Körnermais in einem dreijährigen Feldversuch. Die Unterschiede zwischen den Wirkungen der beiden organischen Dünger waren in fast allen Fällen nicht signifikant, so dass für die Berechnungen die Effekte der Schweinegülle mit denen der Gärprodukte gemittelt wurden. Ausgehend von den maximal erreichten Erträgen der N-Steigerungskurven mit Mineraldünger bzw. mit einer festen N-Düngergabe aus organischem Dünger plus steigende Zugaben von Mineraldünger wurden MDÄ berechnet. Diese sagen aus, wie viel Prozent Mineraldünger-N benötigt wird, um den gleichen Ertrag zu erzielen wie eine organische Düngergabe von ca. 80-95 kg ha⁻¹ N. Die Stickstoffwirkung der organischen Dünger betrug nach den Berechnungen im ersten Jahr 100 %, im zweiten nur 44 und im dritten Jahr 66 %.

Auch für Grünland konnten positive Effekte einer Düngung mit Gärprodukten (aus der Vergärung von Rindergülle) auf den Ertrag nachgewiesen werden (PÖTSCH, 2004). Sowohl die mineralische NPK-Düngung als auch die Düngung mit Rindergülle und vergorener Rindergülle steigerten die Grünlanderträge signifikant gegenüber einer mineralischen PK-Variante. Die Erträge der mit Gärprodukten und Rindergülle gedüngten Varianten lagen zwar etwa 5 % unter denen der mineralisch gedüngten NPK-Variante, die Unterschiede waren jedoch nicht signifikant.

Nicht durchgängig positive Ergebnisse fanden demgegenüber KAUTZ & RAUBER (2007), die die Wirkungen von zwei verschiedenen Gärprodukten (aus der Vergärung von Schweinegülle bzw. Energiepflanzen) in den Aufwandmengen 30 und 60 m³ ha⁻¹ auf den Ertrag von Silomais in zwei aufeinander folgenden Jahren untersuchten. Dabei ergaben sich im ersten Versuchsjahr nur durch die Gärprodukte aus der Energiepflanzenvergärung Ertragssteigerungen, während das Gärprodukt aus Schweinegülle mit hoher applizierter Aufwandmenge den Maisertrag gegenüber der ungedüngten Kontrolle sogar etwas verringerte. Im zweiten Versuchsjahr ergaben sich tendenzielle Ertragssteigerungen durch beide Gärprodukte, wobei die höheren Aufwandmengen auch zu höheren Erträgen führten.

Den Einfluss des Ausgangssubstrates von Gärprodukten auf deren Ertragswirkung untersuchten ASMUS & LINKE (1987), indem sie jeweils vergorene und unvergorene Rinder- und Schweinegülle in ihren Wirkungen auf den Ertrag von Grünmais in einem Gefäßversuch verglichen. Bei einer N-Aufwandmenge von 1 g N je Mitscherlich-Gefäß ergaben sich für Schweinegülle und die Gärprodukte aus Schweinegülle sehr ähnlich hohe relative Ertragssteigerungen gegenüber der Kontrolle von 68 bzw. 69. Die durch Rindergülle und Gärprodukt aus Rindergülle erzielten relativen Ertragssteigerungen lagen demgegenüber mit 35 und 46 deutlich darunter. In einem weiteren Versuch verglichen sie die Wirkungen von Stickstoff aus Schweinegülle mit dem aus Gär-

produkt (aus der Vergärung von Schweinegülle) in ihrer Wirkung auf Kartoffelerträge im Feldversuch. Dabei ergaben sich Ertragssteigerungen von 72 bzw. 69 % gegenüber der ungedüngten Kontrolle. Bei Schweinegülle bewirkt die Vergärung somit trotz des höheren Ammoniumanteils am Gesamtstickstoff in den Gärprodukten keine Verbesserung der Düngewirkung. Nach Meinung der Autoren ist dies mit der leichten Mineralisierbarkeit des organisch gebundenen Stickstoffs in der Schweinegülle zu begründen. Bei Rindergülle erbrachte die Vergärung dagegen eine Verbesserung der Düngewirkung. Trotzdem sollte nach den Autoren für beide Gärprodukte bei einer Düngung mit gleichen N-MDÄ wie für die jeweilige Gülle kalkuliert werden, da aufgrund des hohen Ammoniumgehaltes mit höheren Stickstoffverlusten zu rechnen ist. Für Gärprodukte aus der Vergärung von Schweinegülle sollte für Ausbringungen bei hohen Temperaturen oder im Herbst mit geringeren MDÄ gerechnet werden, da hohe N-Verluste durch NH_3 -Verflüchtigung oder N-Verlagerungen auftreten könnten.

Auch GÖHLER & EMMERLING (2007) untersuchten, ob die Art der als Substrat verwendeten Gülle einen Einfluss auf die Wirkung der Gärprodukte hat. Sie verglichen die chemische Zusammensetzung verschiedener Gärprodukte aus der Vergärung von Schweine-, Rinder- oder Mischgülle und ein oder mehreren Kosubstraten. Auch ihre Düngewirkungen im Vergleich zu mineralischem NPK-Dünger in Gefäßversuchen mit Sommergerste und Winterweizen wurde bestimmt. Bei dem Versuch mit Sommergerste im Jahr 2005 erbrachte die Düngung mit den Gärprodukten aus Schweinegülle im Durchschnitt die höchsten Kornerträge, welche sogar über der mineralisch gedüngten Variante lagen. Die Düngung mit Gärprodukten aus Rinder- bzw. Mischgülle erzielte jedoch durchschnittlich 35 bzw. 59 % geringere Kornerträge als die Düngung mit Mineraldünger. Insgesamt erzielten die Gärprodukte mit 3,4 bis 4,5 ein deutlich ungünstigeres Stroh/Korn-Verhältnis als die Mineraldüngervariante mit 1,8. Im Winterweizenversuch im Jahr 2005/2006 erzielte die Düngung mit Gärprodukten aus der Vergärung von Rindergülle durchschnittlich bessere Kornerträge als die Düngung mit den Gärprodukten aus der Vergärung von Schweinegülle. Jedoch lagen die Kornerträge der Varianten mit Misch-, Rinder- und Schweinegülle alle unter den Erträgen der mineralisch gedüngten Variante, und zwar um 21, 12 bzw. 28 %. Das Stroh/Korn-Verhältnis aller Varianten war vergleichbar und lag zwischen 1,2 und 1,4. Bei der Sommergerste im Jahr 2006 lagen die Kornerträge der mit Gärprodukten gedüngten Varianten im Mittel der Rohgüllearten um 21 bis 39 % unter denen der mineralisch gedüngten Variante, wobei wiederum die Gärprodukte aus Schweinegülle besser abschnitten als die aus Rindergülle. Auch hier zeigte sich ein ungünstigeres Stroh/Korn-Verhältnis durch Düngung mit Gärprodukten. Ein eindeutiger Effekt des Ausgangssubstrates auf die Düngewirkung des Gärproduktes war somit nicht festzustellen.

2.7.3 Qualität der Ernteprodukte

Im Rahmen der in Kapitel 2.7.2 genannten Versuche von BRENNER (2008) wurde auch die Wirkung der vier Gärprodukte auf die Tausendkornmasse (TKM) sowie das Hektolitergewicht der Wintergerste untersucht. Die TKM war mit 35,2 g am geringsten in der Kontrollvariante, die Düngevarianten erzielten Werte zwischen 36,8 und 37,9 g. Auch beim Hektolitergewicht lagen die Düngevarianten mit Werten zwischen 73,4 und 75,6 kg hl⁻¹ deutlich über der Kontrolle, welche eine signifikant geringere Schüttdichte von 48,4 kg hl⁻¹ erreichte.

Im Rahmen der in Kapitel 2.7.1 beschriebenen Versuche von ISLAM *et al.* (2010) wurde auch die Wirkung des Gärprodukts auf die Maisfutterqualität anhand der Gehalte an Trockensubstanz, Rohprotein, Asche, Fasern sowie die Nährelemente N, P, K und S untersucht. Keine signifikanten Unterschiede zwischen den Aufwandmengen ergab die Faseranalytik (ADF und NDF). Für die Trockenmasse und die Aschegehalte konnten bei allen gedüngten Varianten höhere Gehalte gegenüber der Kontrolle festgestellt werden, wobei die Aufwandmenge 70 kg ha⁻¹ N_{min}, wie bereits für die Parameter Wachstum und Ertrag, die höchsten Werte erbrachte. Die N- und Rohproteingehalte wurden durch die Düngegaben 60 und 70 kg ha⁻¹ N_{min} gesteigert, 82 kg ha⁻¹ N_{min} erbrachten verringerte Gehalte gegenüber der Kontrolle. Die P-, K- und S-Gehalte waren am höchsten in der mit 70 kg ha⁻¹ N_{min} gedüngten Variante und am geringsten in der ungedüngten Kontrolle.

3 MATERIAL UND METHODEN

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Parzellenfeldversuche, Praxisversuche sowie Laborversuche durchgeführt. Dabei kamen verschiedene Mess-, Analyse- und Auswertungsmethoden zum Einsatz. Im Folgenden werden die Standorte und die verwendeten Methoden näher erläutert.

3.1 Versuchsstandorte

Die Parzellenfeldversuche wurden am Standort Berlin-Dahlem auf dem Gelände der Lehr- und Forschungsstation der Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät der Humboldt-Universität zu Berlin durchgeführt. Dieses liegt 52° 28' nördlicher Breite und 13° 18' östlicher Länge auf 51 m ü. NN.

Die Durchführung der Praxisversuche erfolgte an den Standorten Dolgeln und Püggen. Dolgeln liegt 52° 29' nördlicher Breite und 14° 23' östlicher Länge auf 46 m ü. NN im östlichen Brandenburg. Püggen liegt 52° 57' nördlicher Breite und 11° 01' östlicher Länge auf 29 m ü. NN im niedersächsischen Wendland. In den nächsten Abschnitten erfolgt für die drei Standorte eine Beschreibung der Bodeneigenschaften und der klimatischen Verhältnisse, da diese einen bedeutenden Einfluss auf die Wirkung von Düngemaßnahmen sowie die Ertragsfähigkeit eines Standortes haben.

3.1.1 Boden

Die Korngrößenanalyse wurde manuell nach Köhn (UTERMANN *et al.*, 2000) durchgeführt (Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: Korngrößenverteilungen des Oberbodens an den Standorten Berlin, Dolgeln und Püggen

Standort	Korngrößenfraktionen [%]					
	Sand	Grobschluff	Mittelschluff	Feinschluff	Schluff gesamt	Ton
Berlin	74,4	10,5	4,6	4,0	19,1	6,5
Dolgeln	60,7	17,6	9,1	7,1	33,8	5,5
Püggen	60,8	17,6	9,6	6,0	33,2	6,0

Der Boden in Berlin-Dahlem ist ein schwach lehmiger Sand, nach der FAO-Klassifikation als Albic Luvisol bezeichnet (AD-HOC-AG BODEN, 2005). Die Böden an den Standorten Dolgeln und Püggen sind mittel schluffige Sande. Vor Versuchsbeginn wurden an allen Standorten die chemischen Bodeneigenschaften ermittelt (Tabelle 3-2).

Tabelle 3-2: Chemische Eigenschaften des Oberbodens vor Versuchsbeginn im Frühjahr 2006 an den Standorten Berlin, Dolgeln und Püggen

Standort	C _{ges}	N _{ges}	C _{hwl} [mg 100 g ⁻¹ TS]	N _{hwl}	P _{DL}	K _{DL}	pH-Wert -
Berlin	1062	69	42	7	36	28	6,8
Dolgeln	817	64	59	10	8	18	5,9
Püggen	1025	76	67	10	9	9	4,7

Alle drei Böden wiesen Humusgehalte ($C_{\text{ges}} \times 1,724$) zwischen 1 und 2 % auf und waren somit als schwach humos einzustufen (AD-HOC-AG BODEN, 2005). Der Boden am Standort Berlin war geprägt durch sehr hohe P- und K-Gehalte (Klasse E nach ROSCHKE *et al.*, 2000) sowie einen hohen pH-Wert von 6,8. Die C- und N-Gehalte wiesen relativ geringe heißwasserlösliche Anteile auf. Diese sind nach KÖRSCHENS *et al.* (1990) ein Maß für die umsetzbare Substanz im Boden. Der Boden in Dolgeln war mit den Nährelementen Phosphor und Kalium gut versorgt (Klassen C und D). Der Gehalt an Gesamtkohlenstoff war mit 817 mg 100 g⁻¹ niedrig, die leicht umsetzbaren C- und N-Gehalte lagen jedoch in einem mittleren Bereich. Auch der pH-Wert war mit 5,9 optimal. Der Boden in Püggen zeichnete sich durch eine ausgeglichene Nährstoffversorgung und einen relativ hohen C_{hwl}-Gehalt aus. Der pH-Wert war jedoch mit einem Wert von 4,7 sehr niedrig.

3.1.2 Klima und Witterung in den Versuchsjahren

Berlin ist im langjährigen Mittel (1971 bis 2000) durch eine Jahresdurchschnittstemperatur von 9,6 °C und eine Jahresniederschlagshöhe von 540 mm gekennzeichnet. Das **erste Versuchsjahr 2006** fiel im Vergleich zum langjährigen Mittel mit einer Jahresdurchschnittstemperatur von 10,8 °C und einer Jahresniederschlagshöhe von 488 mm etwas wärmer und trockener aus (Abbildung 3-1 und Abbildung 3-2). Die Monate Januar bis März waren hingegen durch unterdurchschnittliche Temperaturen geprägt, wodurch die berechnete Vegetationsperiode im Vergleich zum langjährigen Mittel (10. März) ca. 16 Tage später begann und eine deutliche Verkürzung der pflanzlichen Entwicklungsphasen zur Folge hatte. Der sehr trockene Juni wirkte sich zusätzlich negativ auf die Ertragsbildung der sommerannuellen Kulturen aus. Die folgenden Monate Juli und August fielen hingegen überdurchschnittlich feucht aus. Der Juli war zusätzlich durch hohe Temperaturen gekennzeichnet.

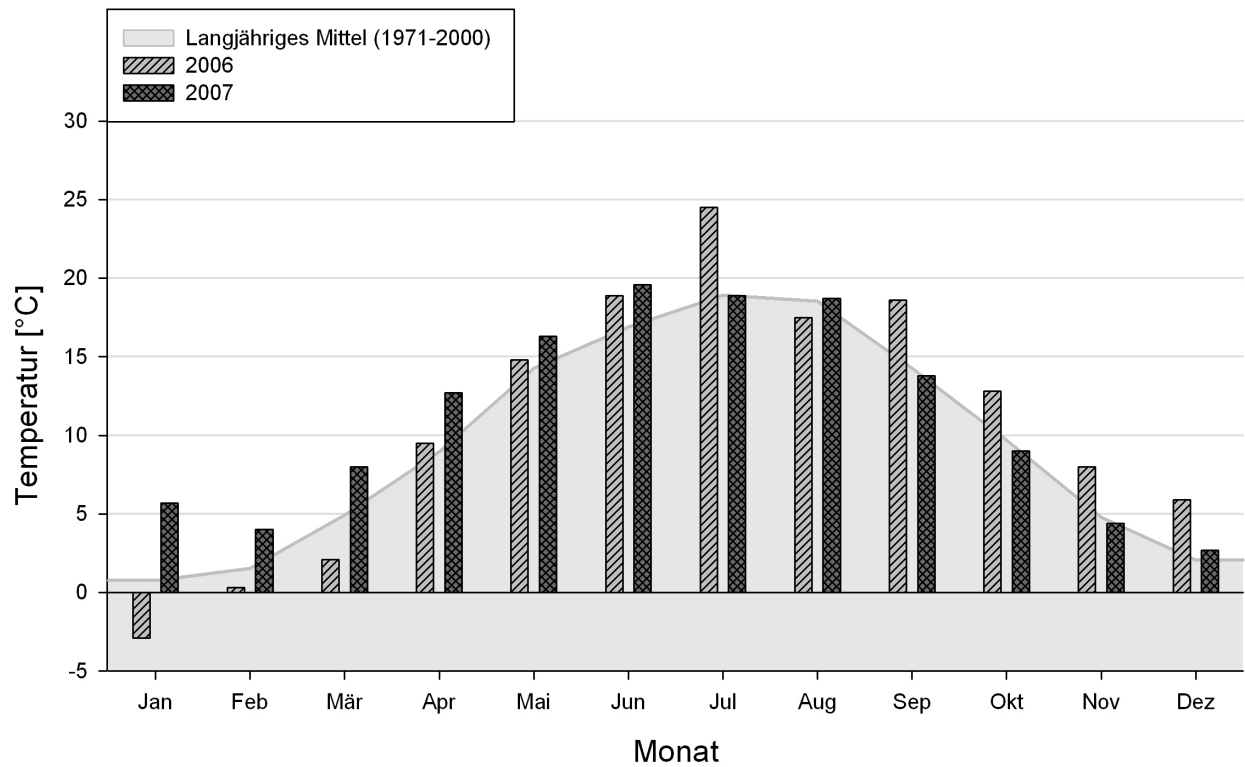


Abbildung 3-1: Mittlere Monatstemperaturen in Berlin-Dahlem in den Jahren 2006 und 2007 im Vergleich zum langjährigen Mittel (1971-2000)

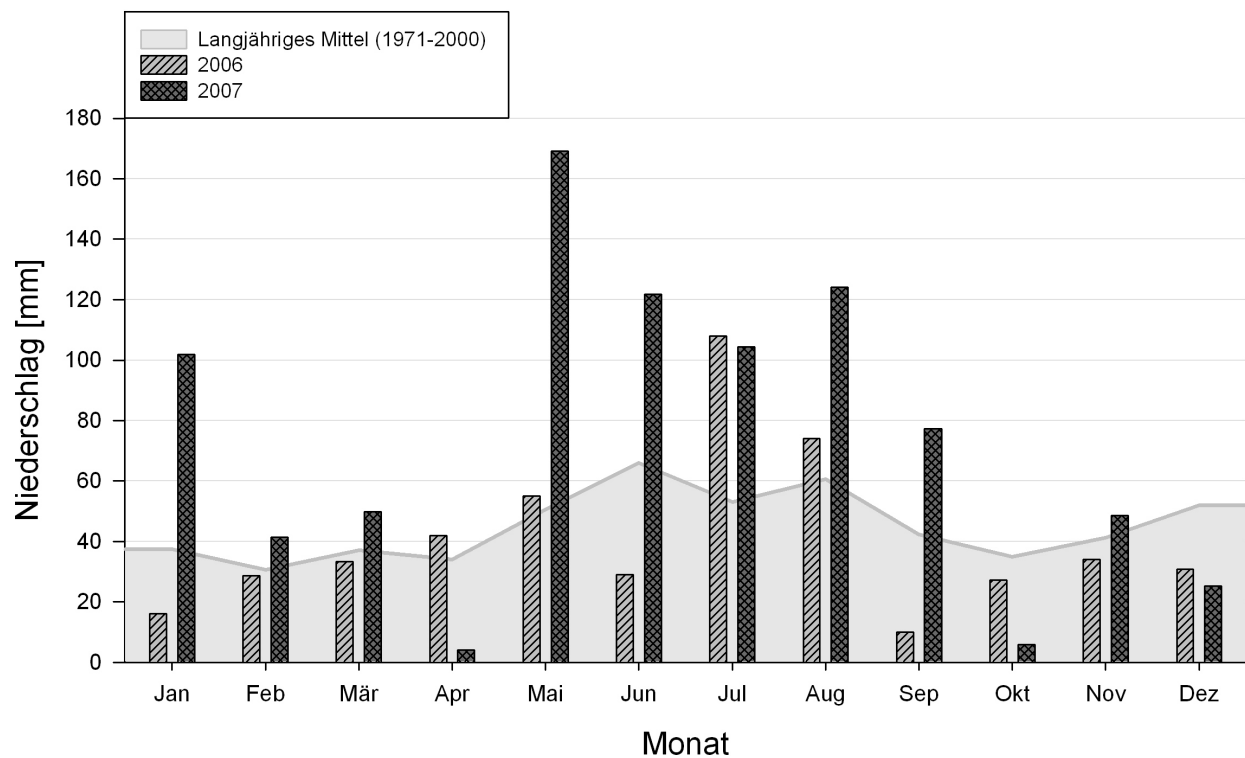


Abbildung 3-2: Mittlere Monatsniederschlagshöhen in Berlin-Dahlem in den Jahren 2006 und 2007 im Vergleich zum langjährigen Mittel (1971-2000)

Im zweiten **Versuchsjahr 2007** lag die Lufttemperatur mit einem Jahresmittel von 11,2 °C ebenfalls deutlich über dem langjährigen Mittel. Die Jahresniederschlagshöhe betrug 874 mm, womit das Jahr 2007 das niederschlagreichste seit Beginn der Wetteraufzeichnungen an der Versuchsstation in Berlin-Dahlem im Jahr 1931 war. Sehr milde Temperaturen und große Niederschlagshöhen im Winter 2006/2007 (Abbildung 3-1 und Abbildung 3-2) führten zu einem berechneten Vegetationsbeginn am 25. Februar, also deutlich früher als im langjährigen Mittel. Der April fiel sehr trocken aus, so dass in dessen Verlauf der Sommerweizenbestand des im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchs Trockenschäden erlitt. Die Monate Mai bis September waren hingegen überdurchschnittlich niederschlagsreich.

Von besonderem Interesse ist das Wetter an den Tagen, an denen die Gärprodukte ausgebracht wurden, da die Höhe potenzieller Ammoniakemissionen davon beeinflusst wird. Ausgewählte Daten der sechs Ausbringungstermine sind in Tabelle 3-3 dargestellt.

Tabelle 3-3: Tagesmittelwerte für Temperatur, relative Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit sowie Tagessumme der Globalstrahlung zu den Ausbringungsterminen der Gärprodukte in den Parzellenfeldversuchen in den Jahren 2006 und 2007

Gedüngte Kultur	Datum	Temperatur	Relative Luftfeuchte	Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe	Verdunstung*
		[°C]	[%]	[m s ⁻¹]	[mm]
Sommerweizen	12.04.2006	5,9	81	1,2	0,4
Silomais Teil 1	26.04.2006	18,1	57	1,3	4,4
Silomais Teil 2	27.04.2006	13,3	90	2,0	0,6
Sommerweizen-Nachdüngung	03.05.2006	18,2	52	1,6	6,7
Sommerweizen	28.03.2007	12,0	51	2,3	2,6
Silomais	24.04.2007	15,1	77	1,0	4,1

* Energetisch mögliche Verdunstung, berechnet aus der Strahlungsbilanz

Der erste Termin für die Ausbringung der Gärprodukte im April 2006 war ausgesprochen kühl und feucht, was ideale Bedingungen zur Verminderung von Ammoniakemissionen bedeutet. Dies spiegelt sich in der geringen theoretischen Verdunstung an diesem Tag wider. Alle weiteren Termine wiesen mit 12 bis 18 °C deutlich höhere Temperaturen auf, unterschieden sich aber in der Luftfeuchte. An den drei wärmsten Tagen 26.04.2006, 03.05.2006 sowie 24.04.2007 war die berechnete theoretische Verdunstung mit Werten zwischen 4,1 und 6,7 mm deutlich höher als an den kühleren Tagen. Die Berechnung der Verdunstung bezieht sich auf eine windgeschützte Fläche. Mit gemessenen Windgeschwindigkeiten zwischen 1,0 und 2,3 m s⁻¹, was Windstärken von 1 bzw. 2 entspricht, hat dieser Faktor die Verdunstung wahrscheinlich nicht sehr stark erhöht.

An beiden **Standorten der Praxisversuche** liegt das Jahresmittel der Lufttemperatur im langjährigen Durchschnitt (1971 bis 2000) mit 8,8 °C in Dolgeln (gemessen an der meteorologischen Station Müncheberg) und 8,9 °C in Püggen (meteorologische Station Lüchow) deutlich

tiefer als in Berlin. Die Jahresniederschlagshöhen liegen im langjährigen Durchschnitt dagegen nur knapp unter dem Wert aus Berlin, sie betragen in Dolgeln 537 und in Püggen 523 mm. Auch an diesen Standorten waren die Jahresniederschlagshöhen im Jahr 2006 mit 363 bzw. 470 mm deutlich geringer und im Jahr 2007 mit 776 bzw. 789 mm sehr viel höher als im langjährigen Mittel. Die Lufttemperaturen waren in beiden Versuchsjahren überdurchschnittlich hoch, sie betrugen in Dolgeln 9,9 bzw. 10,3 °C und in Püggen 10,0 bzw. 10,3 °C.

3.2 Biogasanlagen und Gärprodukte

Im Rahmen der Feldversuche in Berlin wurden Gärprodukte aus drei verschiedenen Biogasanlagen getestet. Ausgewählte Anlagenparameter sowie die stoffliche Beschaffenheit der Gärprodukte werden im Folgenden dargestellt.

3.2.1 Biogasanlagen

Da bei den durchgeführten Untersuchungen insbesondere Gärprodukte aus der Biogaserzeugung mit pflanzlichen Substraten im Fokus standen, wurden zwei Gärprodukte aus der Monofermentation von Energiepflanzen und eines aus der Kofermentation von Rindergülle mit Energiepflanzen gewählt. Alle drei Gärprodukte stammen aus Nassfermentationsanlagen, die im mesophilen Temperaturbereich betrieben werden. Eine Übersicht über weitere Anlagenparameter gibt Tabelle 3-4.

Tabelle 3-4: Verwendete Substrate sowie Prozess- und Anlagenparameter der Biogasanlagen A, B und C

Parameter	Biogasanlage A	Biogasanlage B	Biogasanlage C
Verwendete Substrate im Versuchszeitraum	Mais- und Roggensilage, Roggenschrot	Mais-, Klee- und Grassilage, Festmist, Roggenschrot, Kartoffeln	Maissilage, Rindergülle
Verfahren	zweistufig*	zweistufig*	einstufig*
Endlager	abgedeckt	offen	offen

*x-stufig: x gibt die Anzahl der Reaktoren wieder (zweistufig = ein Fermenter und ein Nachgärer)

Die Biogasanlage A, im östlichen Brandenburg gelegen, bestand aus einem Fermenter (940 m³) und einem Nachgärer (900 m³). Beide Reaktoren sowie das Endlager (1000 m³) waren abgedeckt. Das entstehende Biogas wurde zwei 250 kW_{el}-Blockheizkraftwerken (BHKW) zur Erzeugung elektrischer und thermischer Energie zugeführt. Das anfallende Gärprodukt wurde als Dünger auf den hofeigenen Flächen genutzt.

Die Biogasanlage B war Teil eines ökologisch wirtschaftenden Betriebs im niedersächsischen Wendland. Sie war ebenfalls zweistufig. Der Reaktor und der Nachgärer (jeweils 1500 m³) waren abgedeckt, das 600 m³ große Endlager war offen. Das Biogas wurde drei BHKW mit je

110 kW_{el} zugeführt. Das entstehende Gärprodukt darf nach den Richtlinien des ökologischen Landbaus als Dünger auf den hofeigenen Flächen verwertet werden (s. Kapitel 2.4), es wurde aber auch zum Teil an umliegende landwirtschaftliche Betriebe verkauft.

Die Biogasanlage C lag im Landkreis Potsdam-Mittelmark in Brandenburg. Der Reaktor der einstufigen Anlage hatte eine Größe von 630 m³. Die bei der Stromproduktion durch das BHKW (80 kW_{el}) entstehende Wärme wurde zur Beheizung des Fermenters sowie der umliegenden Gebäude genutzt. Das Gärprodukt wurde in ein offenes Endlager gepumpt und auf den hofeigenen Flächen als Dünger genutzt.

3.2.2 Gärprodukte

Zur einfacheren Benennung werden den in den Versuchen verwendeten Gärprodukten folgende Kürzel zugeordnet:

GP A = Gärprodukt aus der Anlage A (Monofermentation Energiepflanzen)

GP B = Gärprodukt aus der Anlage B (Monofermentation Energiepflanzen)

GP C = Gärprodukt aus der Anlage C (Kofermentation Gülle mit Energiepflanzen).

Für die Düngewirkung sind neben dem organischen Anteil der TS, der organischen Trockensubstanz (oTS), insbesondere die Pflanzennährelemente Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) des anorganischen Anteils ausschlaggebend. Die chemischen Eigenschaften der drei in den Versuchen verwendeten Gärprodukte sind in Tabelle 3-5 aufgeführt.

Tabelle 3-5: Chemische Eigenschaften der Gärprodukte A, B und C in den Jahren 2006 und 2007

Gärprodukt	Jahr	TS [% i. FM]	oTS [% i. FM]	N _{ges} [g kg ⁻¹ FM]	NH ₄ ⁺ -N [g kg ⁻¹ FM]	P _{DL} [g kg ⁻¹ FM]	K _{DL} [g kg ⁻¹ FM]	pH-Wert -
GP A	2006	7,2	5,4	5,5	3,6	0,8	3,3	8,3
	2007	7,0	5,6	5,1	4,1	1,0	3,8	8,2
GP B	2006	6,7	4,9	4,1	2,4	0,7	3,6	8,0
	2007	8,4	6,2	3,8	1,9	0,6	4,2	8,1
GP C	2006	4,9	3,4	4,3	2,6	0,7	3,3	7,9
	2007	5,0	3,6	2,7	2,1	0,6	3,2	7,9

Die TS-Gehalte der Gärprodukte aus der Monofermentation (A und B) lagen mit Werten zwischen 6,7 und 8,4 % deutlich über denen des GP C, die nur 4,9 bzw. 5,0 % betrugen. Die oTS-Gehalte waren im GP A mit 5,4 und 5,6 % in der Frischmasse (i. FM), entsprechend 75 bzw. 79 % i. TS, am höchsten. Das GP B lag mit oTS-Gehalten von 4,9 und 6,2 % i. FM bzw. 73 bis 74 % i. TS im mittleren Bereich, während das GP C mit 3,4 und 3,6 % i. FM, entsprechend 70 bzw. 72 % i. TS den geringsten organischen und somit den höchsten anorganischen Anteil an der Trockensubstanz enthielt.

Die Gesamtstickstoffgehalte (N_{ges}) in den Gärprodukten lagen zwischen 2,7 und 5,5 g kg⁻¹ FM. Die Anteile an Ammoniumstickstoff ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) an N_{ges} lagen zwischen 50 und 80 %. Dabei wies das GP A mit 73 % im Durchschnitt über beide Versuchsjahre den höchsten Wert auf, GP C hatte mit 70 % einen ähnlich hohen Anteil. Mit 55 % $\text{NH}_4^+\text{-N}$ an N_{ges} lag das GP B deutlich unter den anderen beiden Gärprodukten. Der restliche Stickstoffanteil wird als organisch gebunden angenommen, da Voruntersuchungen gezeigt haben, dass der Anteil an Nitratstickstoff ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) vernachlässigbar gering ist (was auf die anaeroben Bedingungen zurückzuführen ist). Die Gehalte an löslichem Phosphor (P_{DL}) lagen zwischen 0,6 und 1,0 g kg⁻¹ FM, dabei wies GP A leicht höhere Werte auf als GP B und C. Die Gehalte an löslichem Kalium (K_{DL}) lagen zwischen 3,2 und 4,2 g kg⁻¹ FM. Die pH-Werte der Gärprodukte aus der Monofermentation lagen zwischen 8,0 und 8,3. Im GP C war der pH-Wert mit 7,9 etwas niedriger.

3.3 Anlage und Beprobung der Parzellen- und Praxisfeldversuche

Im Folgenden wird der Aufbau der Parzellen- und Praxisfeldversuche sowie die darin durchgeführten agrotechnischen Maßnahmen und die verschiedenen Arten der Probeentnahmen beschrieben.

3.3.1 Parzellenfeldversuche

Versuchsaufbau

Die in Berlin durchgeführten Parzellenfeldversuche waren als **zweifaktorielle Spaltanlagen** mit vierfacher Wiederholung angelegt. Dabei stellte die Düngerart den Großteilstückfaktor mit den Prüffaktorstufen Gärprodukt A, B und C sowie Mineraldünger (KAS) dar. Kleinteilstückfaktor war die Stickstoffmenge mit den Prüffaktorstufen 0, 50, 100 und 150 kg ha⁻¹ N (Abbildung 3-3).

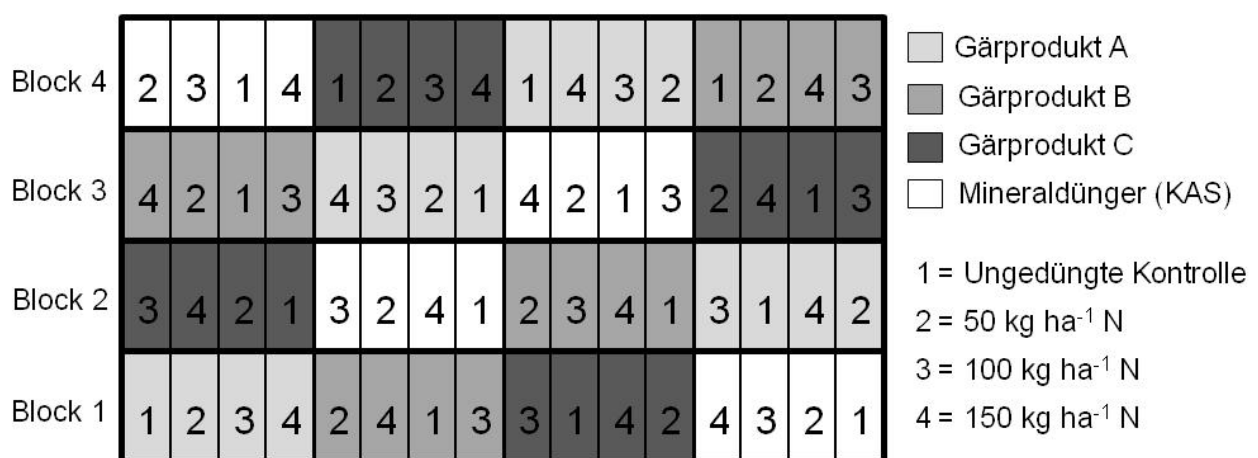


Abbildung 3-3: Anlageplan der Parzellenfeldversuche (zweifaktorielle Spaltanlage)

Die Parzellen waren jeweils $19,5 \text{ m}^2$ groß. Zur Vermeidung von Randeffekten wurde bei der Düngung ein 25 cm und bei der Ertragsbestimmung ein 50 cm breiter Rand belassen, so dass die Größe der Ernteparzellen $7,5 \text{ m}^2$ betrug. Der Sommerweizenbestand im Jahr 2006 ist in Abbildung 3-4 dargestellt.



Abbildung 3-4: Sommerweizenbestand im Jahr 2006 a) Ende Mai und b) Parzelle zur Ernte am 01.08.2006

Düngerarten

Die drei Gärprodukte wurden in ihrer Wirkung mit **mineralischem Dünger** verglichen, der im Folgenden mit „**MD**“ abgekürzt wird. Als mineralischer Stickstoffdünger wurde Kalkammonsalpeter (KAS) verwendet. Für die Phosphor- und Kalium-Ausgleichsdüngung wurden Tripelsuperphosphat und Korn-Kali verwendet.

Nährelementaufwandmengen

In jedem Großteilstück wurde die jeweilige Düngerart in den Stickstoffstufen 0 (ungedüngte Kontrolle) sowie 50, 100 und $150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ randomisiert appliziert. Durch fehlerhafte Stickstoffanalysen im Jahr 2006 gab es jedoch Abweichungen von den geplanten N-Aufwandmengen. Aus diesem Grund werden für das Jahr 2006 im Kapitel 4 unterschiedliche N-Stufen miteinander verglichen, wofür für jeden Dünger die N-Stufe gewählt wurde, welche die geringste Differenz zur Aufwandmenge $150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ aufwies. Tabelle 3-6 beinhaltet eine Übersicht über die ausgebrachten Nährelementmengen aller Dünger in den beiden Versuchsjahren. Die Varianten, welche im Jahr 2006 verglichen werden, sind in fester Schrift hervorgehoben.

Tabelle 3-6: Ausgebrachte Nährelementmengen (N, P, K) der vier Dünger in den Versuchsjahren 2006 und 2007 (für beide Schläge gleich)

Düngerart	N-Stufe	Versuchsjahr 2006			Versuchsjahr 2007		
		N [kg ha ⁻¹]	P [kg ha ⁻¹]	K [kg ha ⁻¹]	N [kg ha ⁻¹]	P [kg ha ⁻¹]	K [kg ha ⁻¹]
GP A	1	84	13	50	50	10	37
	2	168	26	101	100	19	75
	3	252	38	151	149	29	112
GP B	1	65	10	71	50	8	55
	2	129	20	142	100	17	110
	3	194	31	213	150	25	165
GP C	1	124	20	95	47	10	56
	2	249	40	191	95	20	112
	3	373	61	286	142	29	168
MD	1	50	78	68	50	13	49
	2	100	155	135	100	25	99
	3	150	233	203	150	37	148

Die durch Mineraldünger ausgebrachten P- und K-Mengen berechneten sich aus den Mittelwerten der durch die Gärprodukte ausgebrachten Nährelementmengen. Im ersten Jahr wäre der Mittelwert der P-Aufwandmengen der drei 150 kg ha⁻¹ N-Varianten der Gärprodukte 43 kg ha⁻¹ P gewesen. Im Durchschnitt der N-Stufen, die im Folgenden miteinander verglichen werden, wurden 22 kg ha⁻¹ P ausgebracht. Durch einen Analysenfehler wurde hier jedoch mit 233 kg ha⁻¹ P in der mineralisch gedüngten Variante über 400 % zu viel ausgebracht. Kalium sollte entsprechend dem Mittelwert der Gärprodukt-Varianten mit 217 kg ha⁻¹ K ausgeglichen werden. Somit fiel die Ausbringmenge mit 203 kg ha⁻¹ K zu gering aus. Im Verhältnis zu den zu vergleichenden Varianten mit einer durchschnittlichen Aufwandmenge von 113 kg ha⁻¹ K wurden 45 % K zu wenig ausgebracht.

Im zweiten Versuchsjahr wurde mit 37 anstatt 28 kg ha⁻¹ ebenfalls zu viel P gedüngt (+32 %).

Verwendete Sorten und agrotechnische Maßnahmen

In den beiden Versuchsjahren wurden jeweils Sommerweizen und Silomais angebaut. Nach dem Sommerweizen 2006 wurde im Herbst Ölrettich als Zwischenfrucht angebaut und ebenfalls geerntet. Somit war die Fruchtartabfolge für Schlag 1 Sommerweizen, Ölrettich, Silomais und für den 2. Schlag Silomais, Sommerweizen. Tabelle 3-7 gibt eine Übersicht über verwendete Sorten, Vor- und Zwischenfrüchte sowie Zeitpunkte einiger agrotechnischer Maßnahmen in den Versuchen. Pflanzenschutzmaßnahmen erfolgten in allen Parzellen gleich und werden hier nicht aufgeführt.

Tabelle 3-7: Verschiedene Parameter und Zeitpunkte durchgeführter Maßnahmen in den Parzellenfeldversuchen in Berlin-Dahlem

Maßnahme / Parameter	Sommerweizen		Silomais	
	Versuchsjahr 2006	Versuchsjahr 2007	Versuchsjahr 2006	Versuchsjahr 2007
Vorfrucht	Sommer- ölfrüchte	Silomais	Körnermais	Ölrettich (davor Sommerweizen)
Ausbringung der GP	12.04.2006, 03.05.2006 (Nachdüngung)	28.03.2007	26./27.04.2006	24.04.2007
Ausbringung des MD	05.05.2006 (N), 08.05.2006 (P, K)	29.03.2007	12.05.2006	28.04.2007
Einarbeitung der Dünger	jeweils nur GP: 13.04.2006, 04.05.2006	GP und MD: 29.03.2007	Nur GP: 27.04.2006	GP und MD: 28.04.2007
Saatdichte	400 Körner m ⁻²	400 Körner m ⁻²	8 Körner m ⁻²	8 Körner m ⁻²
Saattermin	13.04.2006	30.03.2007	28.04.2006	26.04.2007
Sorte	Piccolo	Piccolo	Lucas*	Lucas*
BBCH 31	30.05.2006	20.05.2007	20.06.2006	15.06.2007
BBCH 51	15.06.2006	07.06.2007	05.07.2006	30.06.2007
BBCH 61	20.06.2006	15.06.2007	20.07.2006	12.07.2007
Erntetermin	01.08.2006	15.08.2007	05.09.2006	27.09.2007
Zwischenfrucht	Ölrettich	keine	keine	keine

*Siloreifezahl 240

Probenahmen

Die Entnahme der **Bodenproben** für bodenchemische Analysen erfolgte vor der Düngung im Frühjahr und nach der Ernte im Herbst. Zur Bestimmung der Ausgangssituation wurden die Felder bei der Probenahme im Frühjahr des Jahres 2006 in vier Blöcke geteilt und von jedem Block eine Mischprobe hergestellt. Im Herbst und im Jahr 2007 wurde dann jede Parzelle einzeln beprobt. Die Bodenentnahme erfolgte bis 20 cm Tiefe durch fünf bis acht Einstiche je Parzelle. Die Proben wurden luftgetrocknet und auf ≤ 2 mm gesiebt. Für die Analyse auf mineralischen Stickstoff (N_{\min}) erfolgten die Probennahmen in den Tiefen 0-30 und 30-60 cm jeweils durch drei Einstiche. Der Boden wurde zeitnah auf ≤ 5 mm gesiebt und bis zur Weiterverarbeitung bei -25 °C gelagert.

Für die **Ertragsbestimmung** wurden jeweils 7,5 m² große Rechtecke aus der Mitte der Düngeparzellen (s. Versuchsaufbau) geerntet. Die gehäckselten Maispflanzen und das Weizenstroh wurden bei der Ernte frisch gewogen, das Weizenkorn vor dem Wiegen gereinigt. Bei der Ernte wurden repräsentative **Pflanzenproben** für Mais und Stroh genommen und später geteilt.

Eine Hälfte wurde für die TS-Bestimmung verwendet, die andere für die chemischen Analysen bei 60 °C getrocknet und anschließend auf 0,5 mm gemahlen. Entsprechend wurde mit dem gereinigten Weizenkorn verfahren.

3.3.2 Praxisversuche

Zur Untersuchung der Wirkungen der Dünger im Praxismaßstab wurden die jeweiligen hofeigenen Gärprodukte an den Standorten Dolgelin (GP A) und Püggen (GP B) in **Praxisgroßversuchen** geprüft, das heißt die Versuche waren in praktisch bewirtschaftete Flächen eingebettet und wurden mit praxisüblichen Methoden bearbeitet. Für die Versuche waren auf Streifen mit 24 bzw. 12 m Breite und 75 m Länge neben der ungedüngten Kontrolle die N-Aufwandmengen 50, 100 und 150 kg ha⁻¹ geplant (Abbildung 3-5).

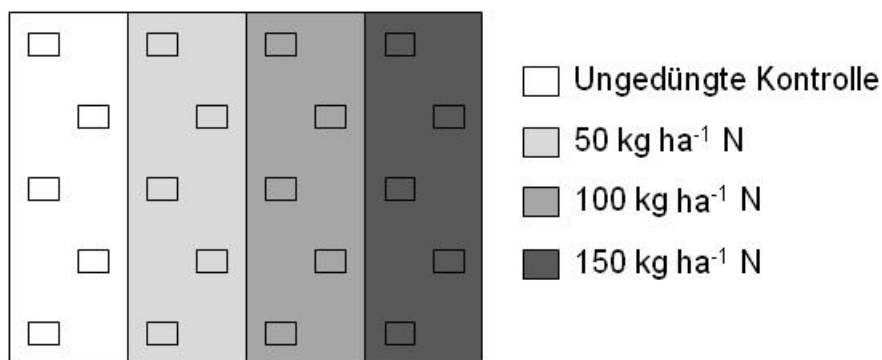


Abbildung 3-5: Anlage der Praxisfeldversuche als Praxisgroßversuche bestehend aus vier Dünge­streifen mit jeweils fünf Beprobungsquadranten

Aufgrund von Analysenfehlern und Rundungen bei der Ausbringung wurden die in Tabelle 3-8 genannten Aufwandmengen appliziert.

Tabelle 3-8: Ausgebrachte Nährelementmengen (N, P, K) an den beiden Praxisversuchsstandorten in den Jahren 2006 und 2007 (für Winterroggen und Silomais)

Standort	N-Stufe	Versuchsjahr 2006			Versuchsjahr 2007		
		N [kg ha ⁻¹]	P [kg ha ⁻¹]	K [kg ha ⁻¹]	N [kg ha ⁻¹]	P [kg ha ⁻¹]	K [kg ha ⁻¹]
Dolgelin	1	74	11	44	50	10	37
	2	148	22	89	100	20	75
	3	222	32	133	150	29	112
Püggen	1	48	12	64	50	8	55
	2	145	25	127	100	16	111
	3	184	37	191	150	24	166

In jedem Abschnitt wurden fünf Teilflächen markiert, in denen die Entnahme von **Boden- und Pflanzenproben** erfolgte. Im Jahr 2006 betrug die Größe dieser Flächen für den Roggenversuch jeweils 1 m² und für die Maisversuche 1,5 m². Im zweiten Versuchsjahr wurden die Flä-

chen der Maisversuche auf je 2 m² vergrößert. Die Ertrags- sowie Inhaltsstoffbestimmungen der Pflanzen wurden für jede der fünf (unechten) Wiederholungen getrennt durchgeführt. Für die Untersuchungen des Bodens wurden im Frühjahr vor der Düngerapplikation und im Herbst zur Ernte Proben bis 20 cm Tiefe entnommen, dabei wurden aus den fünf Wiederholungen Mischproben erzeugt, so dass hier nur eine Probe je Variante untersucht wurde.

An beiden Standorten wurde in den Jahren 2006 und 2007 Silomais angebaut, in Dolgeln wurde das Gärprodukt A zusätzlich an Roggen getestet. Die Roggenversuchsfläche 2007 wurde auf die Maisversuchsfläche von 2006 gelegt, nur in diesem Fall war der Versuchsansatz zweijährig. Eine Übersicht über die Sorten, Vorfrüchte und Zeitpunkte der Durchführung ausgewählter agrotechnischer Maßnahmen gibt Tabelle 3-9.

Tabelle 3-9: Verschiedene Parameter und Zeitpunkte agrotechnischer Maßnahmen der drei Praxisversuche in Dolgeln und Püggen in den Jahren 2006 und 2007

Maßnahme / Parameter	Roggen Dolgeln		Silomais Dolgeln		Silomais Püggen	
	Jahr 2006	Jahr 2007	Jahr 2006	Jahr 2007	Jahr 2006	Jahr 2007
Vorfrucht	Silomais	Silomais	Roggen	Sudangras	Roggen	Brache
GP-Ausbringung	11.04.'06	28.02.'07	11.04.'06	13.04.'07	1. Gabe: 23.06.'06 (0, 50, 100, 100 kg ha ⁻¹ N) 2. Gabe: 10.07.'06 (0, 0, 50, 90 kg ha ⁻¹ N)	1. Gabe: 04.06.'07 (0, 50, 75, 75 kg ha ⁻¹ N) 2. Gabe: 01.07.'07 (0, 0, 25, 75 kg ha ⁻¹ N)
Saatdichte	80 kg ha ⁻¹	70 kg ha ⁻¹	10 Körner m ⁻²	8 Körner m ⁻²	8 Pfl. m ⁻²	10 Pfl. m ⁻²
Saattermin	2.10.'05	08.10.'06	29.04.'06	19.04.'07	23.05.'06	25.04.'07
Sorte	Walet	Askari	Taxxoa*	Nexxos**	Gavott*	Gavott*
Erntetermin	22.06.'06 (BBCH 83)	13.06.'07 (BBCH 83)	18.09.'06	26.09.'07	26.09.'06	14.09.'07

* Siloreifezahl 250

** Siloreifezahl 280

Die Applikation der Gärprodukte erfolgte an beiden Standorten mittels Schleppschlauchverfahren. In Püggen wurden die beiden höchsten Aufwandmengen in zwei Gaben geteilt.

3.4 Untersuchungen am Boden

Der Boden wurde auf verschiedene bodenchemische und -biologische Parameter untersucht. Die dabei angewandten Methoden werden im Folgenden beschrieben.

3.4.1 Bodenchemie

Der Boden wurde auf seinen TS-Gehalt sowie auf den pH-Wert untersucht. Darüber hinaus wurden die Gesamtgehalte und die heißwasserlöslichen Anteile an Kohlenstoff bestimmt. Der

Gesamtkohlenstoffgehalt (C_{ges}) eines Bodens entspricht der Summe der Gehalte an organischem Kohlenstoff (C_{org}) und Carbonat. In den Parzellenfeldversuchen wies der Boden sehr geringe Carbonatgehalte auf. So wurde angenommen, dass der gesamte Kohlenstoff im Boden in organischer Form (C_{org}) vorlag. Der umsetzbare bzw. heißwasserlösliche Kohlenstoff (C_{hwl}) kann nach SCHULZ (1997) durch einen Aufschluss mittels Heißwasserextraktion und anschließender Bestimmung erfasst werden. Zur Untersuchung der Versorgung des Bodens mit Stickstoff wurden die Gesamtstickstoffgehalte (N_{ges}), die heißwasserlöslichen Anteile (N_{hwl}) sowie die mineralischen Stickstoffgehalte (N_{min}) bestimmt. Der Gesamtstickstoff (N_{ges}) lässt sich in organisch sowie anorganisch gebundenen Stickstoff unterteilen. Der anorganische bzw. mineralische Stickstoff (N_{min}) unterliegt starken jahreszeitlichen Schwankungen. Der N_{min} -Wert des Bodens dient in der Praxis zur Berechnung der auszubringenden Düngermenge im Frühjahr bzw. vor der Düngung. Des Weiteren kann der N_{ges} -Gehalt, genau wie der Kohlenstoff im Boden, in eine inerte und eine umsetzbare Fraktion eingeteilt werden. Die leicht umsetzbare Fraktion wird durch den heißwasserlöslichen N-Gehalt (N_{hwl}) widergegeben, der jedoch den mineralischen Stickstoffgehalt mit umfasst und damit auch stärkeren jahreszeitlichen Schwankungen unterliegen ist als der C_{hwl} -Gehalt (SCHULZ, 1997).

Des Weiteren wurden die löslichen und damit pflanzenverfügbaren Anteile an Phosphor und Kalium (P_{DL} , K_{DL}) bestimmt. Eine Übersicht über die für die Analysen verwendeten Methoden und die dazugehörigen Geräte gibt Tabelle 3-10.

Tabelle 3-10: Angewandte Methoden zur Analyse bodenchemischer und –physikalischer Parameter

Parameter	Methode	Gerät
TS	gravimetrisch durch Trocknung bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz	
pH-Wert	elektrometrische Messung in 0,1 molarer CaCl ₂ -Lösung (Methodenbuch VDLUFA Band I, A 5.1.1, VDLUFA, 1991)	pH-Elektrode
C_{ges}, N_{ges}	katalytische Verbrennung (C: DIN ISO 10694:1996-08 ¹² , N: DIN ISO 13878:1998-11 ¹³)	Elementaranalysator „vario MAX CNS“ (Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau, Deutschland)
C_{hwI}, N_{hwI}	infrarotspektroskopische bzw. elektrochemische Messung nach Heißwasserextraktion (Methodenbuch VDLUFA Band I, A 4.3.2, VDLUFA 2004)	„liqui TOC“ (Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau, Deutschland); (analysiert C mittels Infrarotspektroskopie und N mittels elektrochemischen Sensor)
N_{min}	spektralphotometrische Messung nach Aufschluss in 0,01 molarer CaCl ₂ -Lösung im Verhältnis 1:5 (Methodenbuch VDLUFA Band I, A 6.1.4.1, VDLUFA 1997)	Spektralphotometer „Continuous Flow Analyzer San++“ (Skalar Analytical B. V., Breda, Niederlande)
P_{DL}	spektralphotometrische Messung nach Doppellactat-Aufschluss (Methodenbuch VDLUFA Band I, A 6.2.1.2, VDLUFA 1991)	Spektralphotometer „Continuous Flow Analyzer San++“ (Skalar Analytical B. V., Breda, Niederlande)
K_{DL}	flammpotometrische Messung nach Doppellactat-Aufschluss (Methodenbuch VDLUFA Band I, A 6.2.1.2, VDLUFA 1991)	Atomabsorptionsspektrometer (Perkin Elmer, Model AAS 4100, Massachusetts, USA)

3.4.2 Bodenbiologie

Bodenbiologische Parameter eignen sich als Indikatoren für die Bodenqualität. Aus diesem Grund wurde die Aktivität der Bodenmakro- und der Bodenmikrofauna mit jeweils verschiedenen Methoden untersucht.

Untersuchung der mikrobiellen Aktivität des Bodens

Unter Bodenatmung versteht man die Kohlenstoffdioxidabgabe bzw. die Sauerstoffaufnahme eines Bodens. Da diese hauptsächlich aus der Atmung der Mikroorganismen resultiert, ist sie ein Maß für die mikrobielle Aktivität des Bodens. Messungen direkt im Feld werden dafür genutzt, die aktuelle C-Mineralisation im Boden zu bestimmen. Die gemessene CO₂-Exhalation

¹² DIN ISO 10694:1996-08: Bodenbeschaffenheit – Bestimmung von organischem Kohlenstoff und Gesamtkohlenstoff nach trockener Verbrennung (Elementaranalyse).

¹³ DIN ISO 13878:1998-11: Bodenbeschaffenheit – Gesamt-Stickstoff durch trockene Verbrennung (Elementaranalyse).

des ungestörten, bewachsenen Ackerbodens resultiert jedoch nicht nur aus der Atmung der Mikroorganismen sondern auch aus der Wurzelatmung der Pflanzen. Die Atmung der Mikroorganismen macht etwa 2/3 der gemessenen Bodenatmung aus, dieser Anteil ist jedoch je nach angebauter Kultur und ihrer Entwicklungsstufe variabel (WERTH & KUZYAKOV, 2007; SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002). Somit sind Rückschlüsse auf die im Boden mikrobiell umgesetzte Kohlenstoffmenge nicht möglich. Für eine exaktere Erfassung der C-Mineralisation können Laborversuche dienen.

a) *Messung der Bodenatmung im Feld*

Zur Überprüfung der Annahme, dass die Einbringung von organischem Material durch die Gärprodukte einen positiven Effekt auf die Bodenmikroorganismen hat, wurde die Bodenatmung in den Parzellenfeldversuchen wöchentlich gemessen. Hierfür wurde ein Gerät der Firma PP Systems (Amesbury, Massachusetts, USA) eingesetzt, das aus einer Gassammelkammer („Soil Respiration Chamber“, SRC-1), einer Sonde zur Messung der oberflächennahen Bodentemperatur und einer Messeinheit („Environmental Gas Monitor“, EGM-4) besteht (Abbildung 3-6a).

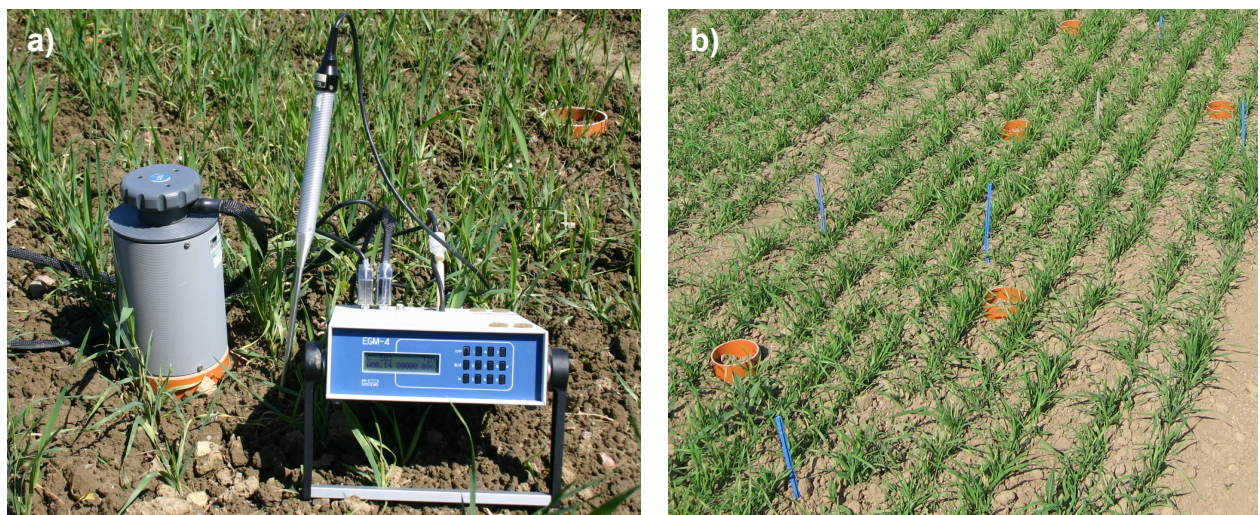


Abbildung 3-6: Bodenatmungsmessung im Sommerweizenfeld a) Bodenatmungsmesssystem, zusammengesetzt aus der Messeinheit (EGM-4, rechts), der Bodenatmungskammer (SRC-1, links) sowie dem Bodenthermometer (Mitte) b) Anordnung der Messpunkte in der Parzelle

Zur Messung wurde die Gassammelkammer direkt über dem Boden platziert und die Veränderung der CO₂-Konzentration mittels eines in der Messeinheit enthaltenen Infrarotgasanalysators in regelmäßigen Abständen (etwa alle fünf Sekunden) zwei bis drei Minuten lang gemessen (KIRSCH *et al.*, 2000). Die Messpunkte im Feld waren durch ca. 10 cm lange Plastikrohre mit einem Durchmesser von 10 cm festgelegt, die zu etwa 3/4 in den Boden eingelassen waren. Auf diese wurde die Gassammelkammer aufgesetzt. Die Messungen wurden in beiden Kulturarten durchgeführt. Dabei wurde sich auf die Dünger GP A und MD (jeweils in allen Aufwandmen-

gen) sowie zwei Wiederholungen beschränkt. In jeder Parzelle befanden sich sieben Messpunkte (Abbildung 3-6b).

b) Messung der Bodenatmung sowie der Methanemissionen im Modellversuch

Um den mikrobiell umgesetzten Anteil des durch das Gärprodukt in den Boden eingebrachten Kohlenstoffs bestimmen zu können, wurde ergänzend ein Laborversuch durchgeführt. Dabei wurde die CO_2 - sowie CH_4 -Freisetzung nach Gärprodukt- bzw. Mineraldüngerapplikation bestimmt. Hierfür wurden je drei Wiederholungen der Varianten ungedüngte Kontrolle, GP A sowie Kalkammonsalpeter (KAS) angesetzt. Dabei betrug die N-Aufwandmenge der gedüngten Varianten $0,2 \text{ g kg}^{-1}$ Boden-TM. Für den Versuchsansatz wurde Boden der Versuchsstation in Berlin-Dahlem verwendet, der auf 15 % Wassergehalt eingestellt wurde. Der mineralische Dünger wurde zur besseren Verteilung in dem zugesetzten Wasser gelöst. In den Gärprodukt-Varianten wurde der Wassergehalt des Düngers zur Erzielung gleicher Bedingungen berücksichtigt. Jeweils 3 kg trockener Boden wurde mit den entsprechenden Mengen an Wasser und Dünger vermengt und in perforierte Kunststoffsäulen (30 cm hoch, 10 cm Durchmesser) gefüllt (Abbildung 3-7a). Diese wurden in zylindrische Behälter (40 cm hoch, 12 cm Durchmesser) gestellt (Abbildung 3-7b) und luftdicht verschlossen. Die neun Säulen wurden bei konstanter Umgebungstemperatur aufgestellt (Abbildung 3-7c).

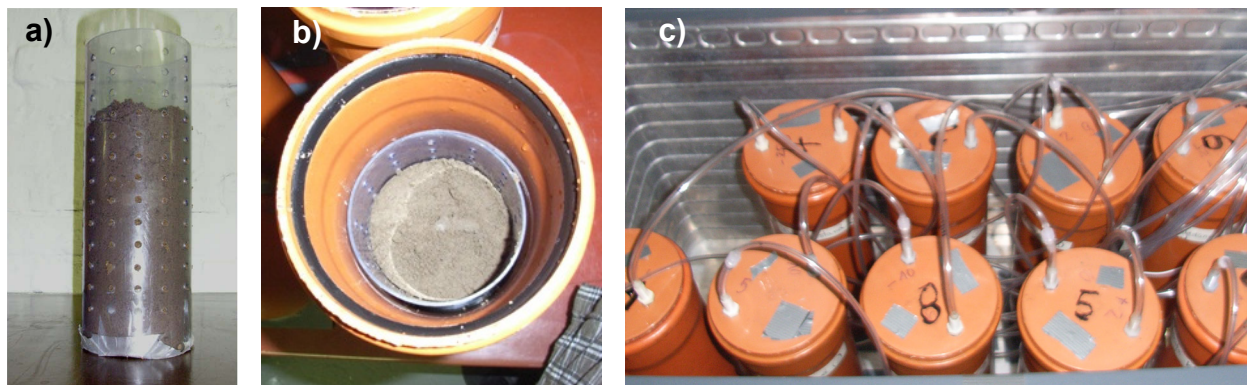


Abbildung 3-7: Aufbau des Modellversuchs zur Messung der CO_2 - sowie der CH_4 -Freisetzung von unterschiedlich gedüngtem Boden a) Testboden in perforiertem Kunststoffrohr b) befülltes Kunststoffrohr im zylindrischen Behälter c) neun verschlossene Versuchsgefäße in isoliertem Raum angeordnet

In die Versuchsgefäße wurde von oben Luft eingeleitet und die Änderung der CO_2 - und CH_4 -Konzentration mit Hilfe eines photoakustischen Infrarot-Multigas-Monitors (INNOVA 1312, INNOVA AirTech Instruments, Ballerup, Dänemark) für jedes Gefäß bestimmt. Die CO_2 - und CH_4 -Flussraten wurden dabei nach folgender Formel berechnet (ZAK *et al.*, 2010):

$$Flussrate_{CO_2, CH_4} = \frac{M_{CO_2, CH_4} * P * v}{R * T * A} * \delta v_{CO_2, CH_4}$$

Dabei sind:

M = Molmasse von CO₂ bzw. CH₄ (44 bzw. 16 g mol⁻¹),

P = Luftdruck [Pa],

v = Volumenstrom [m³ h⁻¹],

R = Gaskonstante [m³ Pa K⁻¹ mol⁻¹],

T = Temperatur [K],

A = Oberfläche des Bodens [m²] und

δv = Konzentrationsänderung von CO₂ bzw. CH₄ im Volumenstrom.

Die Versuchsdauer des Modellversuchs betrug 19 Tage. Der Wassergehalt des Bodens wurde regelmäßig kontrolliert und konstant gehalten.

Wirkung von Gärprodukten auf die Bodenmakrofauna

Stellvertretend für die Bodenmakrofauna wurde der Regenwurm ausgewählt, da Regenwürmer aufgrund zahlreicher Chemorezeptoren auf ihrer Haut empfindlich auf chemische Veränderungen im Boden reagieren. Durch ihre Größe, ihr zahlreiches Vorkommen und ihre relativ leichte Bestimmbarkeit eignen sich Regenwürmer gut als Bioindikatoren für die relative Gesundheit von Bodenökosystemen (KÜHLE, 1982). Deshalb werden sie auch für ökotoxikologische Tests herangezogen, mit denen die Wirkung von Chemikalien bewertet werden soll.

Die Wirkung des GP A auf Regenwürmer wurde in den Parzellenfeldversuchen (s. Kapitel 3.3.1) sowie anhand eines Labortests zum Vermeidungsverhalten von *E. fetida* untersucht. Der jeweilige Versuchsaufbau und die verwendeten Methoden werden im Folgenden beschrieben.

a) Untersuchung der Regenwurmaktivität im Feld

Die Regenwurmaktivität wurde im Jahr 2007 im Sommerweizenfeld untersucht und in einem einfaktoriellen Versuchsansatz der Einfluss der Aufwandmenge des GP A auf die Regenwurmaktivität in vierfacher Wiederholung getestet. Dazu wurden knapp vier Wochen nach der Düngung Abundanz, Masse, Altersstufe (juvenil oder adult) sowie das Artenspektrum der Regenwurmpopulationen im Boden bestimmt (GRUNER, 2008).

Eine Bodenentnahme je Parzelle von 2 x 1/8 m² erfolgte bis zu einer Tiefe von 20 cm, so dass mit vier Wiederholungen insgesamt 1 m² bzw. 0,2 m³ Boden je Variante untersucht wurde. Während der Probennahmen wurden die Bodenfeuchte in 5 bis 15 cm Tiefe sowie die Temperatur im Oberboden (10 cm Tiefe) erfasst. Darauf folgte eine Handauslese der Proben, die auf Regenwürmer durchsucht wurden (Abbildung 3-8a). Zur Erfassung anektischer Regenwurmartener-

folgte in den Ausgrabungsstellen eine anschließende Formalinextraktion mit 1-2 Litern einer 0,2%igen Formalinlösung nach DIN ISO 23611-1:2006¹⁴ (Abbildung 3-8b).



Abbildung 3-8: Untersuchungen der Wirkung von Gärprodukten auf Regenwürmer im Sommerweizenfeld a) Handauslese der Bodenproben und b) Probenahmestelle mit anschließender Formalinextraktion

Der Boden wurde am 23. und 24. April 2007 jeweils vormittags entnommen, um extreme Bodentemperaturen während der Probenahme zu vermeiden. Regenwürmer ziehen sich bei höheren Temperaturen in tiefere Schichten zurück. An beiden Probenahmetagen unterlag die gemessene Bodentemperatur in 10 cm Tiefe Tag- und Nachtschwankungen von 8,7 bis 21,7 °C mit einer Tagesmitteltemperatur von 16,2 °C. Der Wassergehalt des Bodens war für die auf Äckern typische Art *A. caliginosa* mit 12,5 M-% in 5 bis 15 cm Tiefe infolge des trockenen Aprils jedoch suboptimal.

b) Untersuchung des Vermeidungsverhaltens von Eisenia fetida

Zur Überprüfung der im Feldtest festgestellten Tendenzen bezüglich der Regenwurmaktivität wurden im Herbst 2007 zusätzlich zwei Labortests durchgeführt. Dabei wurde das Vermeidungsverhalten der Regenwurmart *E. fetida* bezüglich mit Gärprodukt versetztem Boden geprüft. Diese Art ist insbesondere in Komposten und Misthaufen anzutreffen und wird standardmäßig für ökotoxikologische Testverfahren eingesetzt. Die Vermeidungstests wurden in Anlehnung an HUND-RINKE & WIECHERING (2001) durchgeführt. Nach den Autoren gibt eine 80%ige Vermeidung des Prüfbodens nach Testende (ausgehend von einer 50:50-Verteilung) einen Hinweis auf ein Gefährdungspotential der zu testenden Substanz.

Der Boden wurde von der Fläche des Parzellenfeldversuchs entnommen (Eigenschaften s. Kapitel 3.1.1) und auf ≤ 2 mm gesiebt. Die Wasserkapazität betrug 28 M-% (Bestimmung nach REUTER, 1976). Ein Zweikammersystem wurde jeweils zur Hälfte ca. 6 cm hoch mit

¹⁴ DIN ISO 23611-1:2006: Soil quality – Sampling of soil invertebrates – Part 1: Hand-sorting and formalin extraction of earthworms.

ungedüngtem Kontrollboden sowie Prüfboden (mit Gärprodukt versetzt) befüllt (Abbildung 3-9a). Als Gefäße wurden Kunststoffschalen mit den Maßen (B x L x H) 17 x 12,5 x 6,5 cm verwendet. Pro Testschale wurden zweimal 500 g trockener Boden mit den entsprechenden Mengen an Wasser und Dünger versetzt, wobei der Wassergehalt des Gärproduktes berücksichtigt wurde.

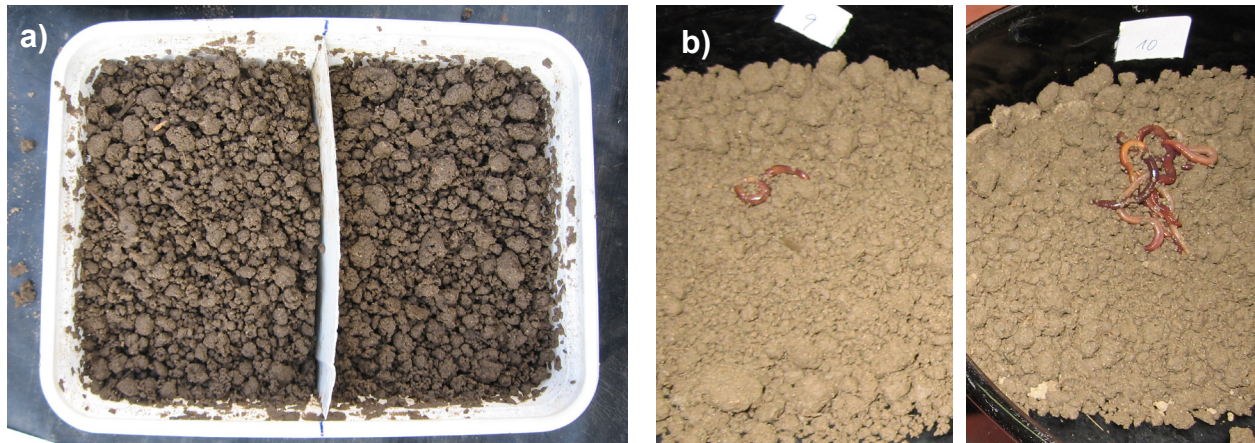


Abbildung 3-9: Vermeidungstest mit der Regenwurmart *Eisenia fetida* mit Prüf- und Kontrollboden
a) Trennung der Versuchshälften nach 48 h Versuchszeit und b) Auszählung der Regenwürmer im Prüf- und Kontrollboden

Beide Vermeidungstests wurden in fünffacher Wiederholung durchgeführt. Die Testschalen wurden bei 20 bis 25 °C aufgestellt. Die Anordnung erfolgte dabei randomisiert. In die Mitte jeder Testschale (zwischen Kontroll- und Prüfboden) wurden zehn Würmer jeweils im gleichen Verhältnis juvenil zu adult gegeben, deren Gewicht zwischen 0,3 und 0,6 g je Wurm betrug. Die Schalen wurden mit einem perforierten Plastikdeckel verschlossen und für 48 h verdunkelt. Danach erfolgte in beiden Bodenvarianten die Bestimmung der Anzahl und des Gewichts der Würmer (Abbildung 3-9b).

Die Durchführung des Tests erfolgte mit zwei verschiedenen Aufwandmengen des GP A und mit verschiedenen Bodenfeuchte-Gehalten (Tabelle 3-11).

Tabelle 3-11: Merkmale der beiden Vermeidungstests hinsichtlich Düngermenge und Bodenfeuchte (nach GRUNER, 2008)

Testmerkmal	Vermeidungstest 1	Vermeidungstest 2
Berechnung der zu applizierenden Gärprodukt-Menge	150 kg N auf 2400 t Bodenmasse	150 kg N auf 1 ha Fläche
Ausgebrachte FM pro 500 g Boden	6,2 g	30,6 g
Bodenfeuchte (M-% von WK_{max})	50	60

Ausgehend von der höchsten Aufwandmenge im Feld ($150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$) wurde bei der Berechnung der zu applizierenden Gärproduktmenge einmal die Bodenoberfläche und einmal die Bodenmasse als Bezugsgröße herangezogen. Bei Berechnungen mit der Bodenoberfläche als Bezugsgröße bleibt unberücksichtigt, dass die Bodentiefe in den Schalen mit ca. 6 cm gegenüber einer Wirkungstiefe von Gärprodukten im Feld von mind. 10 cm sehr gering und somit die Düngerkonzentration im Boden sehr hoch ist. Neben der Düngermenge wurde beim zweiten Versuch auch die Bodenfeuchte höher eingestellt.

3.5 Untersuchungen an Pflanzen

In den verschiedenen Pflanzenbeständen der Feldversuche wurden Messungen bzw. Zählungen zur Bestimmung von Feldaufgang, Bestandesdichte, Pflanzenentwicklung und –wachstum sowie N-Versorgungsstatus (Blattfarbe) durchgeführt. Die Ernteprodukte wurden auf äußere Qualitätsparameter sowie die chemische Zusammensetzung untersucht.

3.5.1 Untersuchungen im Pflanzenbestand

In den beiden Parzellenfeldversuchen wurde der Entwicklungsverlauf der Pflanzenbestände regelmäßig mittels BBCH-Skala erfasst. Im Sommerweizen wurden die Keimdichte (Feldaufgang) im Frühjahr sowie die Bestandesdichte (ährentragende Halme m^{-2}) im Sommer in jeder Parzelle in zwei Messquadraten mit einer Größe von jeweils $0,5 \text{ m}^2$ erfasst. Im Mais erfolgte ebenfalls eine Bestimmung der Pflanzenanzahl je Parzelle im Frühjahr.

In beiden Kulturen wurden wöchentlich die Blattfarbe, die Pflanzenlänge und der Blattflächenindex gemessen. Die Messung der Blattfarbe erfolgte mittels „N-Tester“ (HYDRO Agri GmbH & Co. KG, Dülmen, Deutschland). Die mit diesem Gerät erhaltenen Blattgrünwerte sind ein indirektes Maß für den Chlorophyllgehalt der Blätter. Dieser hängt eng mit dem N-Versorgungszustand der Pflanze zusammen, solange andere Nährelemente, insbesondere Schwefel, ausreichend vorhanden sind. Diese Korrelation wurde sowohl für Getreide als auch für Mais bestätigt (YARA, 2004). Der N-Tester ermittelt dimensionslose Blattgrünwerte. Anhand dieser Werte können Düngeempfehlungen für einige Getreidearten abgeleitet werden. In den Parzellenfeldversuchen wurden die Messungen für beide Kulturarten jedoch lediglich für einen Vergleich des Versorgungszustandes der unterschiedlich gedüngten Bestände verwendet.

Die Messung der Pflanzenlänge erfolgte an fünf bis zehn Pflanzen je Parzelle. Der Blattflächenindex wurde mittels „LAI-2000 Plant Canopy Analyzer“ (LI-COR, Lincoln, Nebraska, USA) erfasst.

3.5.2 Untersuchungen zur äußeren Qualität der Ernteprodukte und deren Inhaltsstoffe

Äußere Qualität der Ernteprodukte

Zur Bestimmung der äußeren Qualität des Sommerweizenkorns wurde die Tausendkornmasse (TKM) in dreifacher Wiederholung bestimmt sowie eine Siebsortierung mit zweifacher Wiederholung durchgeführt. Der später zur Darstellung der Ertragsstruktur wichtige Parameter „Körner je Ähre“ wurde aus der Bestandesdichte und der TKM berechnet.

Inhaltsstoffe der Ernteprodukte

Für die Ernteprodukte Weizenkorn, Weizenstroh sowie Mais-, Ölrettich und Roggenganzpflanzen wurden die Gehalte an Kohlenstoff, Stickstoff, Phosphor und Kalium bestimmt. Die dafür verwendeten Methoden sind in Tabelle 3-12 zusammengefasst.

Tabelle 3-12: Verwendete Methoden zur Untersuchung der Ernteprodukte hinsichtlich der inhaltlichen Zusammensetzung

Parameter	Methode / Geräte
$C_{\text{ges}}, N_{\text{ges}}$	katalytische Verbrennung nach Dumas mit Elementaranalysator „vario MAX CNS“ (Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau, Deutschland), (C: DIN ISO 10694:1996 ¹⁵ ; N: DIN ISO 13878:1998 ¹⁶)
P_{ges}	spektralphotometrische Messung mittels Spektralphotometer „Continuous Flow Analyzer San++“ (Skalar Analytical B. V., Breda, Niederlande) nach Mikrowellenaufschluss mit „Mars Express“ (CEM, North Carolina, USA), (Methodenbuch VDLUFA Bd. VII, A 2.1.1, VDLUFA, 2008)
K_{ges}	flammpotometrische Messung mittels Atomabsorptionsspektrometer (Perkin Elmer, Model AAS 4100, Massachusetts, USA) nach Mikrowellenaufschluss mit „Mars Express“ (CEM, North Carolina, USA), (Methodenbuch VDLUFA Band VII A 2.1.1, VDLUFA, 2008)

Der Rohproteingehalt des Sommerweizenkorns wurde durch Multiplikation des N-Gehaltes mit dem Faktor 5,7 berechnet.

3.6 Untersuchungen an Gärprodukten

Bei der chemischen Analyse von Gärprodukten gibt es deutschlandweit noch kein einheitliches Vorgehen. So wird unterschiedlich gehandhabt, welche Nährelemente und -stoffe aus der

¹⁵ DIN ISO 10694:1996-08: Bodenbeschaffenheit – Bestimmung von organischem Kohlenstoff und Gesamtkohlenstoff nach trockener Verbrennung (Elementaranalyse).

¹⁶ DIN ISO 13878:1998-11: Bodenbeschaffenheit – Gesamt-Stickstoff durch trockene Verbrennung (Elementaranalyse).

Frisch- oder aus der Trockenmasse bestimmt werden. Auch die Aufschluss- und Messmethoden unterscheiden sich. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Gärprodukte wurden auf den TS- und oTS-Gehalt sowie auf ihren pH-Wert untersucht. Des Weiteren wurden die Gehalte an den Pflanzennährelementen N, P und K sowie an NH_4^+ -N bestimmt. Tabelle 3-13 gibt eine Übersicht über die angewandten Methoden.

Tabelle 3-13: Angewandte Methoden zur Untersuchung der Gärprodukte auf verschiedene physikalische und chemische Parameter

Parameter	Methode / Geräte
TS	gravimetrisch: Trocknung bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz
oTS	gravimetrisch: Trocknung bei 550 °C bis zur Gewichtskonstanz
pH-Wert	Elektrometrisch
N _{ges}	Nach Kjeldahl aus der Frischsubstanz
NH ₄ ⁺ -N	Nach Kjeldahl aus der Frischsubstanz
P _{DL}	Aufschluss des frischen Materials nach Doppellactat-Methode; Messung mit Spektrophotometer „Continuous Flow Analyzer San++“ (Skalar Analytical B. V., Breda, Niederlande)
K _{DL}	Aufschluss des frischen Materials nach Doppellactat-Methode; Messung mit Atomabsorptionsspektrometer (Perkin Elmer, Model AAS 4100, Massachusetts, USA)

3.7 Datenaufbereitung

3.7.1 Berechnung der Kennzahlen zur Düngewirksamkeit der Gärprodukte

Die Düngewirksamkeit der Gärprodukte wurde anhand von vier verschiedenen Kennzahlen berechnet. Die Berechnungen wurden anhand der Daten aus dem Jahr 2007 für die Kulturen Sommerweizen (Stroh- plus Kornerträge) und Silomais und mit den 100 kg ha⁻¹ N-Varianten durchgeführt. Die Methoden werden im Folgenden kurz beschrieben.

Methode 1 („relativer Ertrag“): Der TM-Ertrag der mineralisch gedüngten Variante wurde auf 100 % gesetzt und der Ertrag der gleich hoch mit Stickstoff aus den Gärprodukten gedüngten Varianten hierzu prozentual ins Verhältnis gesetzt.

Methode 2 („relativer Ertrag nach Abzug der Kontrolle“): Der TM-Ertrag der ungedüngten Kontrollvarianten wurde jeweils von den TM-Erträgen der gedüngten Varianten abgezogen. Die berechneten Mehrerträge wurden wie in Methode 1 zueinander ins Verhältnis gesetzt.

Methode 3 („Mineraldüngeräquivalent nach Ertrag“): Die TM-Erträge der MD-Variante wurden an eine quadratische bzw. lineare Funktion angepasst. Die Erträge der mit 100 kg ha⁻¹ N aus Gärprodukten gedüngten Varianten wurden in die Gleichung eingesetzt und somit berech-

net, mit welcher N-Aufwandmenge der Mineraldünger den gleichen Ertrag erreicht hat (in Anlehnung an die Definitionen eines Mineraldüngeräquivalents von KORIATH *et al.*, 1975, s. Kapitel 2.7.2).

Methode 4 („Mineraldüngeräquivalent nach N-Entzug“): Die N-Entzüge der MD-Variante wurden an eine quadratische bzw. lineare Funktion angepasst. Die N-Entzüge der mit $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ aus Gärprodukten gedüngten Varianten wurden in die Gleichung eingesetzt und somit berechnet, mit welcher N-Aufwandmenge der Mineraldünger den gleichen N-Entzug erreicht hat (in Anlehnung an die Definitionen eines Mineraldüngeräquivalents von SCHILLING, 2000, s. Kapitel 2.7.2).

3.7.2 Statistische Datenaufbereitung

Für die Auswertung der Feldversuchsergebnisse wurden die Mittelwerte und Standardabweichungen mit Excel (Microsoft) berechnet. Die weitere statistische Auswertung erfolgte mit der Statistiksoftware SAS 9.13 mit der Prozedur MIXED. Dabei wurden die Parzellenfeldversuche als Spaltanlage (nur die Bodenatmung als Blockanlage) und die Praxisversuche als randomisierte Anlage behandelt. Zunächst wurden die Voraussetzungen der Normalverteilung (Shapiro-Wilk-Test) sowie der Varianzhomogenität (Levene-Test) überprüft. Waren diese gegeben, wurde eine zwei- bzw. einfaktorielle Varianzanalyse (F-Test und Tukey-Test mit $\alpha = 0,05$) durchgeführt. Bei nicht erfüllten Voraussetzungen wurde eine Rang-Varianzanalyse mit der Methode AnovaF (BRUNNER, 1999) durchgeführt.

4 ERGEBNISSE

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Feld- und Laborversuche dargestellt. Im ersten Teil wird auf die Wirkungen der drei Gärprodukte und des Mineraldüngers auf den Boden eingegangen. Es wurden sowohl bodenchemische als auch bodenbiologische Parameter untersucht. Im zweiten Teil werden die Wirkungen auf die Pflanzen dargestellt. Dabei wird zunächst auf das Wachstum und die Entwicklung, anschließend auf die Erträge und Qualitätsparameter des Erntegutes von Sommerweizen und Silomais aus den Parzellenfeldversuchen eingegangen. Im letzten Teil erfolgt eine Darstellung der Ergebnisse der Praxisfeldversuche, in denen die Wirkung von zwei Gärprodukten auf die Erträge verschiedener Kulturarten untersucht wurde.

4.1 Wirkungen der Gärproduktdüngung auf den Boden

Ein ökologisch nachhaltiger Umgang mit dem Boden ist für die Landwirtschaft von großer Bedeutung. Ziele bei der Bewirtschaftung sollten somit sein, die Lebensraumfunktion zu erhalten und gesunde Nutz- und Nahrungspflanzen anzubauen, ohne dabei der Umwelt zu schaden. Hierfür müssen die eingesetzten Düngemittel geeignete Nährstoffzusammensetzungen haben und toxikologisch unbedenklich sein. Im Folgenden werden die Untersuchungsergebnisse zur Wirkung einer Düngung mit Gärprodukten auf bodenchemische und bodenbiologische Parameter dargestellt.

4.1.1 Bodenchemische Parameter

Der Boden aus den Parzellenfeldversuchen wurde auf die Gehalte an Gesamt- und heißwasserlöslichem Kohlenstoff (C_{ges} , C_{hwl}) sowie Gesamt-, heißwasserlöslichem und mineralischem Stickstoff (N_{ges} , N_{hwl} , N_{min}) untersucht. Des Weiteren wurden die löslichen Phosphor- (P_{DL}) und Kaliumgehalte (K_{DL}) sowie der pH-Wert bestimmt. Da die Nährstoffgehalte und der pH-Wert durch die Witterung und mikrobielle Umsetzungsprozesse im Verlauf der Jahreszeiten größeren Schwankungen unterliegen können, erfolgte die statistische Auswertung für jeden Probenahmetermin separat. Aufgrund der unterschiedlich hohen Düngergaben wird für das Jahr 2006 auf die Mittelwerte über die Aufwandmengen bzw. Dünger nicht eingegangen. In den Tabellen 7-2 bis 7-6 im Anhang sind die entsprechenden Werte aus diesem Grund grau dargestellt.

Kohlenstoffhaushalt

Der Boden des **Schlages 1** mit der Anbaufolge Sommerweizen, Zwischenfrucht Ölrettich und Silomais wies C_{ges} -Ausgangswerte im Frühjahr 2006 von $1103 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ auf, der leicht lösliche bzw. umsetzbare Anteil (C_{hwl}) an C_{ges} betrug mit $43 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ ca. 4 % (Zusammenfassung der Ergebnisse in Tabelle 4-1, die ausführlichen Ergebnisse mit statistischer Auswertung finden sich

in den Tabellen 7-1 und 7-2 im Anhang). Im Herbst 2006 hatte die Düngerart einen Effekt auf die C_{ges} - und C_{hwl} -Gehalte. Auch im Frühjahr 2007 war dies für den C_{hwl} -Gehalt der Fall (Tabelle 7-1 im Anhang). Hier wiesen die mineralisch gedüngten Parzellen im Mittel über die Aufwandmengen mit durchschnittlich $27 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ die höchsten C_{hwl} -Gehalte auf. Dieser Wert lag signifikant über dem Mittelwert von $22 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ der mit GP B gedüngten Parzellen (Tabelle 7-2 im Anhang). Ein Vergleich der Kohlenstoffgehalte der mit $\text{ca. } 150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ gedüngten Parzellen ergab lediglich einen signifikant höheren Gehalt an C_{hwl} von $40 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ durch das GP C gegenüber den mineralisch gedüngten Parzellen mit $29 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ im Herbst 2006 (Tabelle 4-1). Insgesamt konnte im zweijährigen Versuch auf Schlag 1 kein eindeutiger Effekt einer Gärproduktdüngung auf den Kohlenstoffgehalt im Boden nachgewiesen werden.

Der Boden des **Schlages 2** mit dem Fruchtfolgepaar Silomais und Sommerweizen wies zu Beginn der Versuche einen C_{ges} -Gehalt von $1021 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ auf. Der Anteil an heißwasserlöslichem Kohlenstoff machte mit $41 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1} C_{\text{hwl}}$ ebenfalls $\text{ca. } 4 \%$ aus. Anders als bei dem Boden von Schlag 1 lag für dieses Fruchtfolgepaar im Herbst 2006 und 2007 ein Effekt bedingt durch den Faktor N-Aufwandmenge auf den C_{ges} -Gehalt im Mittel über die vier Dünger vor (Tabelle 7-1 im Anhang). Im Herbst 2007 lag der Wert der $150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ -Parzellen gemittelt über die Düngerarten bei $1007 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ und damit signifikant über dem Wert der Kontrollparzellen von $963 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1} C_{\text{ges}}$ (Tabelle 7-2 im Anhang). Auf den C_{hwl} -Gehalt hatte im Herbst 2006 der Faktor Dünger einen Effekt, im Frühjahr 2007 bestanden Wechselwirkungen zwischen den Faktoren Düngerart und Düngeraufwandmenge (Tabelle 7-1 im Anhang). Beim Vergleich der C-Gehalte der mit $\text{ca. } 150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ gedüngten Parzellen zeigte sich wie bei dem Boden von Schlag 1 ein Effekt auf den C_{hwl} -Gehalt im Herbst 2006. Mit 39 bis $43 \text{ mg } C_{\text{hwl}} 100 \text{ g}^{-1}$ Boden war der Gehalt in den mit Gärprodukten gedüngten Parzellen signifikant höher als in den mineralisch gedüngten Parzellen mit $33 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1} C_{\text{hwl}}$ (Tabelle 4-1).

Insgesamt gab es auf beiden Schlägen wenig Effekte der verschiedenen Dünger und Aufwandmengen auf die C_{ges} - und C_{hwl} -Gehalte des Bodens. Im ersten Versuchsjahr bewirkten die Gärprodukte eine signifikante Erhöhung des C_{hwl} -Gehaltes gegenüber der Mineraldüngervariante in den hochgedüngten Parzellen. Dieser Effekt wurde im zweiten Versuchsjahr nicht bestätigt.

Stickstoffhaushalt

Der Boden des **Schlages 1** wies einen Gehalt an Gesamtstickstoff zu Beginn der Versuche im Frühjahr 2006 von $71 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ auf. Davon waren mit $7 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1} N_{\text{hwl}}$ etwa 10% leicht umsetzbar (Tabelle 4-1 und Tabelle 7-3 im Anhang).

Der N_{min} -Gehalt betrug mit $0,27 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ etwa $0,4 \%$ des N_{ges} . Das entspricht einem mineralischen Stickstoffvorrat von 12 kg ha^{-1} , bezogen auf eine Bodentiefe von 0 bis 30 cm . In den darunterliegenden 30 cm Boden waren zusätzlich noch $0,17 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ bzw. $8 \text{ kg ha}^{-1} N_{\text{min}}$ vorhanden (Tabelle 4-1 und Tabelle 7-4 im Anhang). Auf den N_{ges} -Gehalt hatten die Faktoren

Düngerart und Aufwandmenge an keinem Probenahmetermin einen Effekt (Tabelle 7-1 im Anhang). Des Weiteren gab es keine signifikanten Unterschiede beim N_{ges} -Gehalt der mit $\text{ca. } 150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ gedüngten Parzellen (Tabelle 4-1). Beim N_{hwl} -Gehalt zeigten sich ebenfalls kaum signifikante Unterschiede zwischen den Varianten. Nur im Frühjahr 2007 hatte der Faktor Düngerart einen Effekt (Tabelle 7-1 im Anhang). Der über die Aufwandmenge gemittelte N_{hwl} -Gehalt der mineralisch gedüngten Parzellen lag mit $5 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ signifikant höher als in den mit GP B gedüngten Parzellen mit $4 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ (Tabelle 7-3 im Anhang). Unterschiede zwischen den N_{hwl} -Gehalten der mit $150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ gedüngten Parzellen gab es nicht (Tabelle 4-1). Auf die N_{min} -Gehalte in 0-30 cm Tiefe hatte im Herbst 2006 die Aufwandmenge einen Effekt und es bestanden Wechselwirkungen zwischen den Faktoren Aufwandmenge und Düngerart. Auf die N_{min} -Gehalte in 30-60 cm Tiefe hatte die Aufwandmenge ebenfalls einen Effekt (Tabelle 7-1 im Anhang). Im Frühjahr 2007 gab es Wechselwirkungen zwischen den Faktoren Düngerart und Aufwandmenge für die N_{min} -Werte in 30-60 cm Bodentiefe. In den mit $150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ aus GP A gedüngten Parzellen lag der N_{min} -Wert mit $0,37 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ bzw. 17 kg ha^{-1} signifikant über dem Wert der Kontrollparzellen mit $0,25 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ bzw. $11 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}_{\text{min}}$ (Tabelle 7-4 im Anhang). Unterschiede zwischen den N_{min} -Gehalten der mit $\text{ca. } 150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ gedüngten Parzellen gab es in den Versuchen auf diesem Schlag zu keinem Probenahmezeitpunkt (Tabelle 4-1).

Auf **Schlag 2** enthielt der Boden zu Beginn der Versuche $68 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ N}_{\text{ges}}$. Auch hier betrug der leicht umsetzbare Anteil mit $7 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ N}_{\text{hwl}}$ etwa 10 % an N_{ges} (Tabelle 4-1 und Tabelle 7-3 im Anhang).

Der Anteil des N_{min} betrug mit $0,31 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ knapp 0,5 %. Das entspricht einem mineralischen Stickstoffvorrat von 14 kg ha^{-1} in einer Tiefe bis 30 cm. In der Bodenschicht in 30-60 cm Tiefe waren noch $0,10 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ bzw. 5 kg ha^{-1} enthalten (Tabelle 4-1 und Tabelle 7-4 im Anhang). Effekte der Düngung (Düngerart und Aufwandmenge) auf den N_{ges} -Gehalt gab es nur im Herbst 2007 (Tabelle 7-1 im Anhang). Der Boden der gedüngten Varianten (50 bis $150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$) wies tendenziell höhere Gehalte als der ungedüngte Boden auf. Der Mittelwert über die Aufwandmenge $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ war mit $80 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ N}_{\text{ges}}$ signifikant höher als der Mittelwert der Kontrollvarianten mit $73 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ (Tabelle 7-3 im Anhang). Die mit GP A gedüngten Parzellen enthielten gemittelt über die Aufwandmengen mit $81 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ signifikant mehr N_{ges} als die mit GP B ($76 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$) und KAS ($75 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$) gedüngten Parzellen. Unterschiede zwischen den N_{ges} -Gehalten der mit $\text{ca. } 150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ gedüngten Varianten gab es nicht (Tabelle 4-1).

Tabelle 4-1: C-, N-, P- und K-Gehalte sowie pH-Werte ausgewählter Varianten der Parzellenfeldversuche in Abhängigkeit von der Düngerart, der Aufwandmenge sowie des Probenahmezeitraumes

Mittelwerte eines Parameters und eines Probenahmezeitraumes mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant, Tukey-Test mit $\alpha = 0,05$ bzw. Rangverfahren 5 %, $n = 4$

Probenahmezeitpunkt	Variante	Nährstoffgehalte und pH-Wert des Bodens auf SCHLAG 1 (Sommerweizen, Ölrettich, Silomais)									Nährstoffgehalte und pH-Wert des Bodens auf SCHLAG 2 (Silomais, Sommerweizen)								
		C _{ges}	C _{hwl}	N _{ges}	N _{hwl}	N _{min} 0-30 cm	N _{min} 30-60 cm	P _{DL}	K _{DL}	pH-Wert	C _{ges}	C _{hwl}	N _{ges}	N _{hwl}	N _{min} 0-30 cm	N _{min} 30-60 cm	P _{DL}	K _{DL}	pH-Wert
		[mg 100 g ⁻¹]									[mg 100 g ⁻¹]								
Frühjahr 2006	Schlag gesamt	1103	43	71	7	0,27	0,17	39	27	6,8	1021	41	68	7	0,31	0,10	34	30	6,8
Herbst 2006	MW Kontrolle	1176	36	96	6	0,55	0,23	36	26	7,2	1054	37	79	4	0,19	0,07	33	25	7,0
	GP A, 168 kg ha ⁻¹ N	1166 ^a	39 ^{ab}	96 ^a	6 ^a	0,70 ^a	0,33 ^a	35 ^a	27 ^a	7,2 ^a	1006 ^a	39 ^b	80 ^a	5 ^a	0,20 ^a	0,06 ^a	35 ^a	27 ^a	7,0 ^a
	GP B, 129 kg ha ⁻¹ N	1115 ^a	33 ^{ab}	97 ^a	6 ^a	0,58 ^a	0,32 ^a	36 ^a	29 ^{ab}	7,2 ^a	1028 ^a	43 ^b	78 ^a	5 ^a	0,23 ^a	0,06 ^a	35 ^a	26 ^a	7,0 ^a
	GP C, 124 kg ha ⁻¹ N	1149 ^a	40 ^b	97 ^a	7 ^a	0,68 ^a	0,30 ^a	37 ^a	28 ^{ab}	7,2 ^a	1029 ^a	40 ^b	84 ^a	5 ^a	0,18 ^a	0,11 ^a	33 ^a	27 ^a	7,0 ^a
	MD, 150 kg ha ⁻¹ N	1127 ^a	29 ^a	94 ^a	7 ^a	0,85 ^a	0,30 ^a	45 ^b	32 ^b	7,1 ^a	1036 ^a	33 ^a	75 ^a	4 ^a	0,46 ^a	0,15 ^a	39 ^a	28 ^a	6,9 ^a
Frühjahr 2007	MW Kontrolle	1117	24	80	5	0,50	0,30	35	25	7,1	966	22	80	5	0,25	0,20	34	26	7,0
	GP A, 150 kg ha ⁻¹ N	1144 ^a	25 ^a	79 ^a	5 ^a	0,49 ^a	0,37 ^a	36 ^a	25 ^a	7,1 ^a	990 ^a	23 ^a	82 ^a	7 ^a	0,25 ^a	0,21 ^a	35 ^a	26 ^a	7,0 ^a
	GP B, 150 kg ha ⁻¹ N	1095 ^a	22 ^a	80 ^a	4 ^a	0,53 ^a	0,33 ^a	35 ^a	25 ^a	7,1 ^a	986 ^a	23 ^a	83 ^a	6 ^{ab}	0,19 ^a	0,17 ^a	34 ^a	26 ^a	7,0 ^a
	GP C, 150 kg ha ⁻¹ N	1122 ^a	23 ^a	78 ^a	5 ^a	0,55 ^a	0,29 ^a	35 ^a	27 ^a	7,1 ^a	969 ^a	22 ^a	80 ^a	6 ^{ab}	0,22 ^a	0,18 ^a	34 ^a	27 ^a	6,9 ^a
	MD, 150 kg ha ⁻¹ N	1114 ^a	28 ^a	78 ^a	6 ^a	0,54 ^a	0,30 ^a	39 ^a	28 ^a	7,1 ^a	987 ^a	23 ^a	76 ^a	5 ^b	0,29 ^a	0,19 ^a	36 ^a	27 ^a	6,9 ^a
Herbst 2007	MW Kontrolle	1067	27	71	3	0,24	0,11	34	21	7,4	963	28	73	2	0,40	0,25	32	23	7,0
	GP A, 150 kg ha ⁻¹ N	1129 ^a	26 ^a	75 ^a	3 ^a	0,25 ^a	0,09 ^a	35 ^a	23 ^a	7,4 ^a	996 ^a	32 ^a	79 ^a	3 ^a	0,48 ^a	0,23 ^a	34 ^a	24 ^a	7,2 ^a
	GP B, 150 kg ha ⁻¹ N	1113 ^a	29 ^a	75 ^a	3 ^a	0,23 ^a	0,14 ^a	34 ^a	22 ^a	7,4 ^a	1012 ^a	29 ^a	77 ^a	2 ^a	0,49 ^a	0,19 ^a	33 ^a	25 ^{ab}	7,0 ^a
	GP C, 150 kg ha ⁻¹ N	1098 ^a	30 ^a	71 ^a	4 ^a	0,24 ^a	0,13 ^a	34 ^a	24 ^a	7,4 ^a	1045 ^a	30 ^a	78 ^a	3 ^a	0,46 ^a	0,22 ^a	31 ^a	27 ^b	7,0 ^a
	MD, 150 kg ha ⁻¹ N	1086 ^a	29 ^a	68 ^a	3 ^a	0,23 ^a	0,16 ^a	39 ^a	27 ^a	7,3 ^a	974 ^a	27 ^a	73 ^a	2 ^a	0,41 ^a	0,28 ^a	33 ^a	26 ^{ab}	6,9 ^a

Die N_{hwl} -Gehalte waren an allen Probenahmeterminen gemittelt über die Aufwandmengen in den mit Gärprodukten gedüngten Parzellen höher als in den mineralisch gedüngten Parzellen. Diese Unterschiede waren jedoch nur im Herbst 2006 signifikant. Beim Vergleich der N_{hwl} -Gehalte in den mit ca. $150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ gedüngten Parzellen zeigte sich im Frühjahr 2007 mit $7 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ in den mit GP A gedüngten Parzellen ein signifikant höherer Gehalt als in den mineralisch gedüngten Parzellen mit $5 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ (Tabelle 4-1). Die Gehalte an mineralischem Stickstoff wurden auf diesem Schlag lediglich im Herbst 2006 in der Bodentiefe 0-30 cm durch die Aufwandmenge verändert (Tabellen 7-1 und 7-4 im Anhang). Auf beiden Schlägen waren im Herbst 2006 die Anteile von N_{min} an N_{ges} in den mineralisch gedüngten Parzellen deutlich höher als in den mit Gärprodukten gedüngten.

Insgesamt waren in einem Großteil der gedüngten Parzellen im Herbst noch leicht höhere Stickstoffgehalte als in den Kontrollvarianten festzustellen. Bei den Versuchen auf Schlag 2 war ein positiver Effekt der Gärprodukte auf den N_{hwl} -Gehalt zu erkennen, dies war in den Versuchen auf Schlag 1 nicht der Fall.

Gehalte an Phosphor und Kalium

Die Gehalte an P_{DL} und K_{DL} lagen vor Versuchsbeginn im Boden beider Schläge mit Werten von 39 (Schlag 1) bzw. $34 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1} P_{\text{DL}}$ (Schlag 2) und 27 (Schlag 1) bzw. $30 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1} K_{\text{DL}}$ (Schlag 2) sehr hoch (Tabelle 4-1 und Tabelle 7-5 im Anhang).

Die in Kapitel 3.3.1 beschriebenen Düngefehler bei der mineralischen P- und K-Ausgleichsdüngung ließen sich über die gesamten Probenahmeterminen anhand der P- und K-Gehalte im Boden nachweisen. Im Boden des **Schlages 1** hatten im Herbst 2006 die Faktoren Düngerart und Aufwandmenge sowohl auf den P- als auch auf den K-Gehalt einen Effekt und es bestanden Wechselwirkungen zwischen diesen Faktoren (Tabelle 7-1 im Anhang). Die mineralische Düngung führte in den mit $150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ gedüngten Parzellen zu einem signifikanten Anstieg des P-Gehaltes von $38 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ der Kontrollvariante auf $45 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$. Der K-Gehalt nahm ebenfalls signifikant von $26 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ der Kontrollvariante auf $32 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ zu (Tabelle 7-5 im Anhang). Bei den mit Gärprodukten gedüngten Parzellen stiegen die P- und K-Gehalte weniger stark oder gar nicht an. Das zeigte sich auch beim Vergleich der mit ca. $150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ gedüngten Parzellen. Hier war der P-Gehalt mit $45 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ in den mineralisch gedüngten Parzellen signifikant höher als in den mit Gärprodukten gedüngten Parzellen mit 35 bis $37 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ P}$. Der K-Gehalt der mineralisch gedüngten Parzellen lag mit $32 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ signifikant über den mit GP A gedüngten Parzellen mit $27 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ (Tabelle 4-1). Im Frühjahr 2007 war dieser Effekt noch erkennbar. Der Faktor Aufwandmenge hatte, gemittelt über die vier Dünger, einen Effekt auf die P- und K-Gehalte (Tabelle 7-1 im Anhang). In den mit $150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ gedüngten Parzellen lagen die P- und K-Gehalte mit $36 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ P}$ bzw. $26 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ K}$ signifikant über denen der Kontrollvarianten mit $35 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ P}$ bzw. $25 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ K}$ (Tabelle 7-5 im Anhang). Nach der Maisernte im Herbst 2007 hatten die Faktoren Dünger und Aufwandmen-

ge einen Effekt auf die P-Gehalte (Tabelle 7-1 im Anhang). In den mit den Aufwandmengen 100 und 150 kg ha⁻¹ N gedüngten Parzellen war der P-Gehalt gemittelt über alle Düngerarten mit 35 bzw. 36 mg 100 g⁻¹ signifikant höher als in den Kontrollparzellen mit 34 mg 100 g⁻¹. In den mit 150 kg ha⁻¹ N gedüngten Parzellen war der P-Gehalt zusätzlich höher als in den mit 50 kg ha⁻¹ N gedüngten Parzellen mit 34 mg 100 g⁻¹. Der P-Gehalt in den mit dem GP B gedüngten Parzellen war im Mittel über die Aufwandmengen mit 34 mg 100 g⁻¹ signifikant niedriger als in den mineralisch gedüngten Parzellen mit 37 mg 100 g⁻¹ (Tabelle 7-5 im Anhang). Die K-Gehalte wurden im Herbst 2007 nur durch den Faktor Aufwandmenge beeinflusst (Tabelle 7-1 im Anhang). Gemittelt über die Düngerarten lag der K-Gehalt in den mit 150 kg ha⁻¹ N gedüngten Parzellen mit 24 mg 100 g⁻¹ signifikant über denen der ungedüngten sowie den mit 50 kg ha⁻¹ N gedüngten Parzellen von 21 bzw. 22 mg 100 g⁻¹ K. Zwischen den mit 150 kg ha⁻¹ N gedüngten Parzellen gab es im Jahr 2007 hinsichtlich der P- und K-Gehalte keine nachweisbaren Unterschiede mehr (Tabelle 4-1).

Im Boden des **Schlages 2** waren trotz der gleichen Düngungsfehler wie auf Schlag 1 zu keinem Zeitpunkt Effekte durch die Faktoren Düngerart oder Aufwandmenge auf die P-Gehalte nachweisbar (Tabellen 7-1 und 7-5 im Anhang). Lediglich der P-Gehalt in den mineralisch mit 150 kg ha⁻¹ N gedüngten Parzellen lag mit 39 mg 100 g⁻¹ P signifikant über denen der ungedüngten sowie den mit 50 kg ha⁻¹ N gedüngten Parzellen von 32 bzw. 35 mg 100 g⁻¹ P. Zwischen den mit ca. 150 kg ha⁻¹ N gedüngten Parzellen gab es zu keinem Zeitpunkt signifikante Unterschiede (Tabelle 4-1). Die K-Gehalte wurden im Herbst 2006 sowohl durch die Aufwandmenge als auch durch die Düngerart verändert. Im Frühjahr 2007 gab es keine Effekte durch die Düngung auf den K-Gehalt des Bodens. Im Herbst 2007 hatten wieder die Faktoren Düngerart und Aufwandmenge einen Effekt auf die K-Gehalte (Tabelle 7-1 im Anhang). Gemittelt über die Düngerarten stieg in den gedüngten Varianten (50 bis 150 kg ha⁻¹ N) der K-Gehalt von 23 in der Kontrolle auf 25 mg 100 g⁻¹ an. Die K-Gehalte der mit GP C und MD gedüngten Parzellen lagen im Mittel über die Aufwandmengen mit jeweils 25 mg 100 g⁻¹ signifikant über den Gehalten der mit GP A gedüngten Parzellen von 24 mg 100 g⁻¹ K (Tabelle 7-5 im Anhang). Beim Vergleich der mit 150 kg ha⁻¹ N gedüngten Parzellen lag der K-Gehalt im Herbst 2007 in den mit GP C gedüngten Parzellen über dem der mit GP A gedüngten Parzellen (Tabelle 4-1).

Insgesamt gab es einige signifikante Unterschiede in den P- und K-Gehalten der unterschiedlich gedüngten Parzellen. Tendenziell erhöhte eine Düngung mit dem GP C den Kaliumgehalt des Bodens gegenüber den Kontrollparzellen. Die meisten signifikanten Erhöhungen der P- und K-Gehalte wurden jedoch durch die fehlerhafte zu hohe mineralische P- und K-Düngung bewirkt.

pH-Wert

Der pH-Wert des Bodens lag vor Versuchsbeginn auf beiden Feldern bei 6,8 (Tabelle 4-1 und Tabelle 7-6 im Anhang). In den Versuchen auf **Schlag 1** hatte nur im Herbst 2006 der Faktor Düngerart einen Effekt auf den pH-Wert des Bodens (Tabelle 7-1 im Anhang). Der über die Aufwandmengen gemittelte pH-Wert war in den mineralisch gedüngten Parzellen signifikant geringer als in den mit den GPA und C gedüngten Parzellen (Tabelle 7-6 im Anhang). Die mit ca. 150 kg ha⁻¹ N gedüngten Parzellen unterschieden sich zu keinem Zeitpunkt in diesem Parameter (Tabelle 4-1).

Im Boden des **Schlages 2** hatten die Faktoren Aufwandmenge und Düngerart zu keinem Probenahmetermin einen Einfluss auf den pH-Wert (Tabelle 7-1 im Anhang). Unterschiede zwischen den mit der Aufwandmenge 150 kg ha⁻¹ N gedüngten Parzellen waren auf diesem Schlag ebenfalls in keinem Fall nachweisbar (Tabelle 4-1).

Insgesamt gab es Tendenzen, dass der Boden-pH-Wert durch die Gärprodukte mit ihren pH-Werten von ca. 8 angehoben wird, was bei Kalkammonsalpeter nicht der Fall war. Diese Tendenz war jedoch nur in der Anbaufolge Sommerweizen, Ölrettich, Silomais erkennbar.

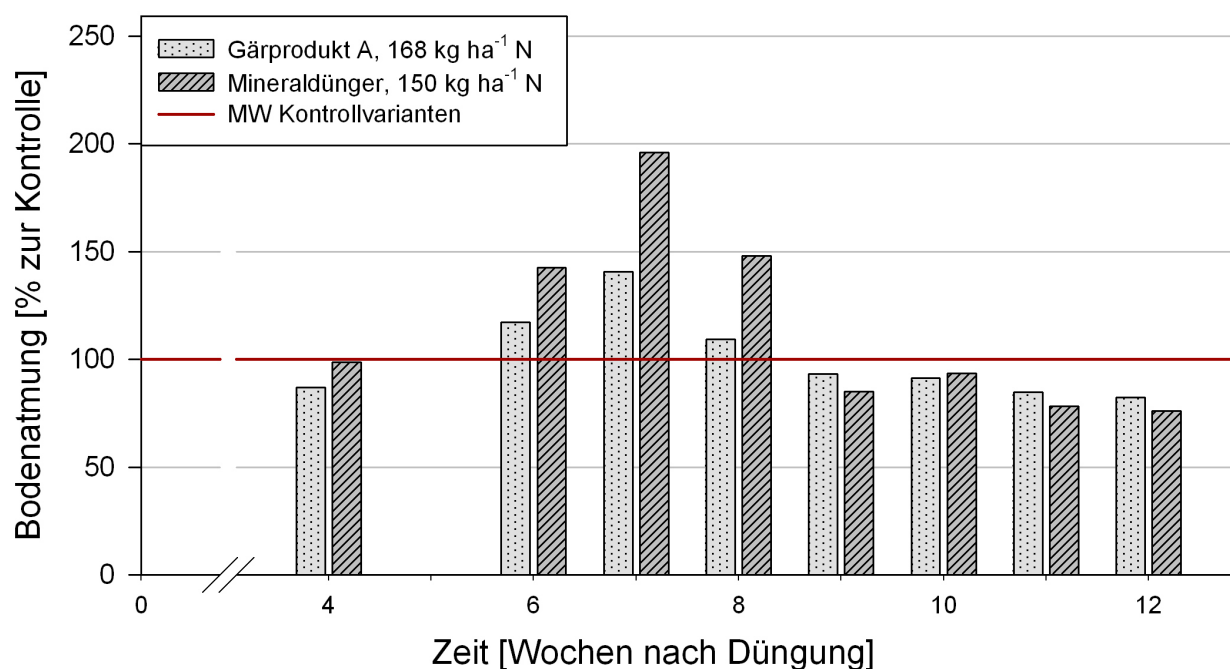
4.1.2 Mikrobielle Aktivität

Die mikrobielle Aktivität im Boden bzw. der Abbau organischer Verbindungen durch Mikroorganismen im Boden nach Gärprodukt- und Mineraldüngerapplikation wurde zum einen durch Messung der Bodenatmung direkt in den Parzellenversuchen und zum anderen in einem Laborversuch untersucht.

Bodenatmung in den Parzellenfeldversuchen

Da die Bodenatmung von der Temperatur sowie von der Feuchte des Bodens abhängt und diese Faktoren zwischen den einzelnen Messterminen stark schwanken können, werden im Folgenden die gemessenen Werte relativ zur ungedüngten Kontrolle graphisch dargestellt. Die absoluten Werte mit der statistischen Auswertung sind in Tabellen unter den Graphiken dargestellt. Da die Bodenatmung nur in zwei der vier Wiederholungen gemessen wurde, konnten in keinem Fall statistische Unterschiede zwischen den Varianten nachgewiesen werden.

Der zeitliche Verlauf der Bodenatmung unter **Sommerweizen** im Jahr **2006** in Abhängigkeit von der Düngung ist in Abbildung 4-1 dargestellt. Die Bodenatmung im Feld wurde 4 bis 12 Wochen nach der Düngerausbringung gemessen.



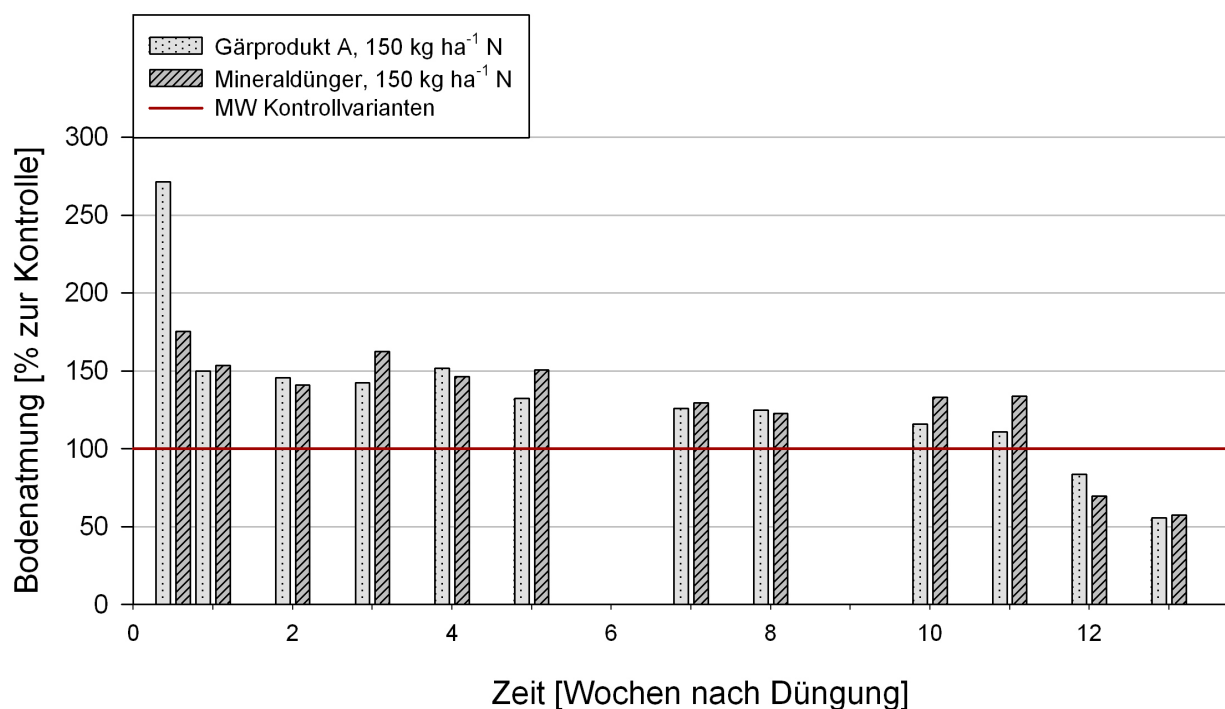
Variante	Bodenatmung [g CO ₂ m ⁻² h ⁻¹]							
Kontrolle	0,44 ^a	0,34 ^a	0,18 ^a	0,34 ^a	0,65 ^a	0,64 ^a	0,59 ^a	0,42 ^a
GP A	0,38 ^a	0,40 ^a	0,25 ^a	0,37 ^a	0,60 ^a	0,59 ^a	0,50 ^a	0,34 ^a
MD	0,43 ^a	0,49 ^a	0,35 ^a	0,51 ^a	0,55 ^a	0,60 ^a	0,46 ^a	0,32 ^a

Abbildung 4-1: Zeitlicher Verlauf der Bodenatmung unter Sommerweizen nach Gärprodukt- bzw. Mineraldüngung (ca. 150 kg ha⁻¹ N) im Jahr 2006; Grafik: Werte in Prozent vom Mittelwert der Kontrollvarianten, Tabelle: gemessene Bodenatmung [g CO₂ m⁻² h⁻¹]

Mittelwerte mit gleichen Buchstaben innerhalb eines Messtermins unterscheiden sich nicht signifikant voneinander, Tukey-Test mit $\alpha = 0,05$; $n = 2$

Über diesen Zeitraum zeigten die beiden gedüngten Varianten (GP A und MD) gleiche Tendenzen. In der 4. Woche nach Düngung war die Bodenatmung in beiden gedüngten Varianten etwa gleich der Bodenatmung in der Kontrollvariante. In der 6. bis 8. Woche nach der Düngerausbringung zeigte sich ein positiver Effekt der Düngung auf die Bodenatmung, welcher allerdings nicht signifikant war. In der 6. und 8. Woche war die Bodenatmung in den gedüngten Varianten um bis zu 48 % gegenüber der Kontrolle erhöht. Die Bodenatmungswerte in der mineralisch gedüngten Variante lagen an beiden Terminen über denen der mit Gärprodukt gedüngten Variante. In der 7. Woche nach der Düngerapplikation wurde in beiden gedüngten Varianten die maximale Steigerung der Bodenatmung gegenüber der Kontrolle erreicht. Mit 96 % war diese in den mineralisch gedüngten Parzellen jedoch deutlich höher als in den mit Gärprodukten gedüngten Parzellen mit 41 %. In der 9. bis 12. Woche zeigte sich ein tendenziell negativer Effekt der beiden Dünger auf die Bodenatmung.

Im Jahr **2007** wurde mit den Messungen der Bodenatmung bereits 2 Tage nach der Düngerausbringung begonnen und diese in meist wöchentlichem Abstand bis 13 Wochen nach der Düngung durchgeführt (Abbildung 4-2).



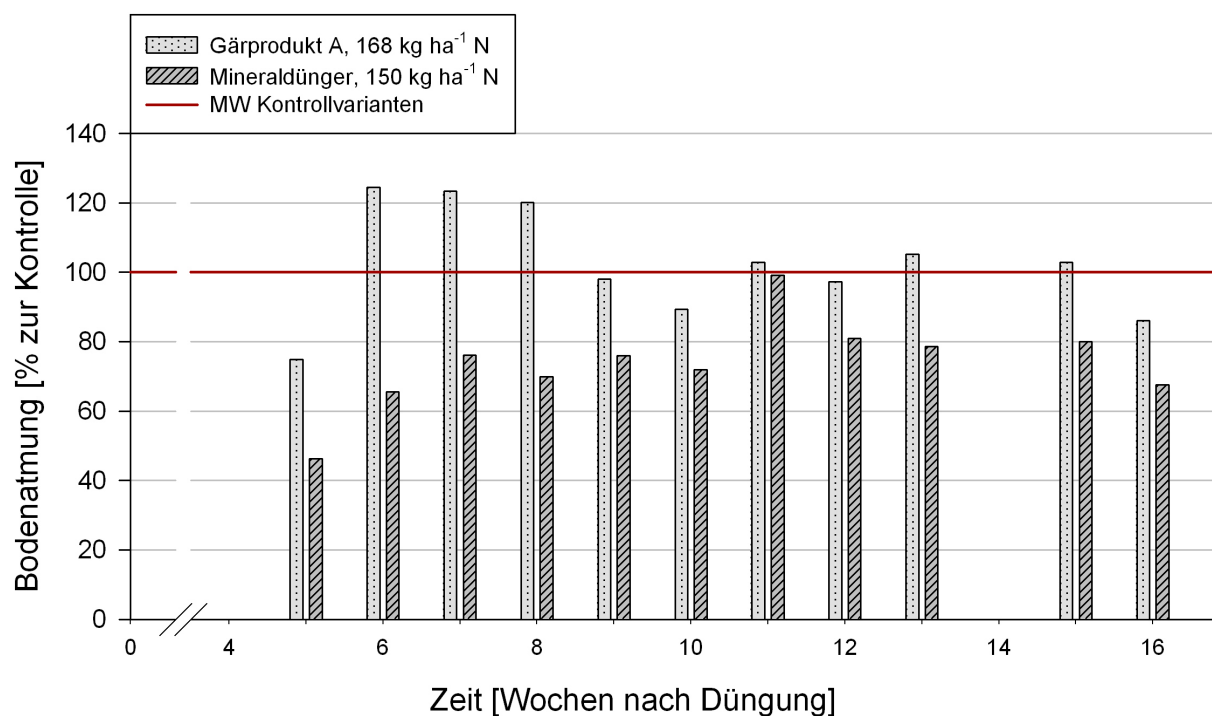
Variante	Bodenatmung [g CO ₂ m ⁻² h ⁻¹]											
Kontrolle	0,04 ^a	0,04 ^a	0,08 ^a	0,03 ^a	0,12 ^a	0,15 ^a	0,33 ^a	0,20 ^a	0,28 ^a	0,37 ^a	0,46 ^a	0,14 ^a
GP A	0,10 ^a	0,06 ^a	0,11 ^a	0,05 ^a	0,18 ^a	0,19 ^a	0,42 ^a	0,25 ^a	0,33 ^a	0,41 ^a	0,38 ^a	0,08 ^a
MD	0,07 ^a	0,06 ^a	0,11 ^a	0,05 ^a	0,17 ^a	0,22 ^a	0,43 ^a	0,25 ^a	0,38 ^a	0,50 ^a	0,32 ^a	0,08 ^a

Abbildung 4-2: Zeitlicher Verlauf der Bodenatmung unter Sommerweizen nach Gärprodukt- bzw. Mineraldüngung (ca. 150 kg ha⁻¹ N) im Jahr 2007; Grafik: Werte in Prozent vom Mittelwert der Kontrollvarianten, Tabelle: gemessene Bodenatmung [g CO₂ m⁻² h⁻¹]

Mittelwerte mit gleichen Buchstaben innerhalb eines Messtermins unterscheiden sich nicht signifikant voneinander, Tukey-Test mit $\alpha = 0,05$; n = 2

Einen deutlichen Unterschied zwischen den beiden Düngervarianten gab es bei der ersten Messung, 2 Tage nach Ausbringung der Dünger. Die Erhöhung der Bodenatmung gegenüber der Kontrolle durch Düngung mit GP A betrug hier 171 %, während die mineralische Düngung die Bodenatmung lediglich um 75 % erhöhte. An allen darauf folgenden Messterminen war die Höhe der Bodenatmung in den beiden gedüngten Varianten sehr ähnlich. Dabei hatte die Düngung noch bis 11 Wochen nach der Ausbringung einen positiven Effekt auf die Bodenatmung, welche um 11 bis 63 % gesteigert wurde. Wie auch im Vorjahr kehrte sich der die Bodenatmung fördernde Effekt nach einigen Wochen, in diesem Jahr etwa 12 Wochen nach der Düngung, in einen hemmenden Effekt um. Die Bodenatmung war in der 12. und 13. Woche nach Düngerausbringung bis 44 % gegenüber der Kontrolle verringert.

Die Messungen der Bodenatmung unter **Silomais** im Jahr **2006** erfolgten 5 bis 16 Wochen nach der Düngerausbringung (Abbildung 4-3).



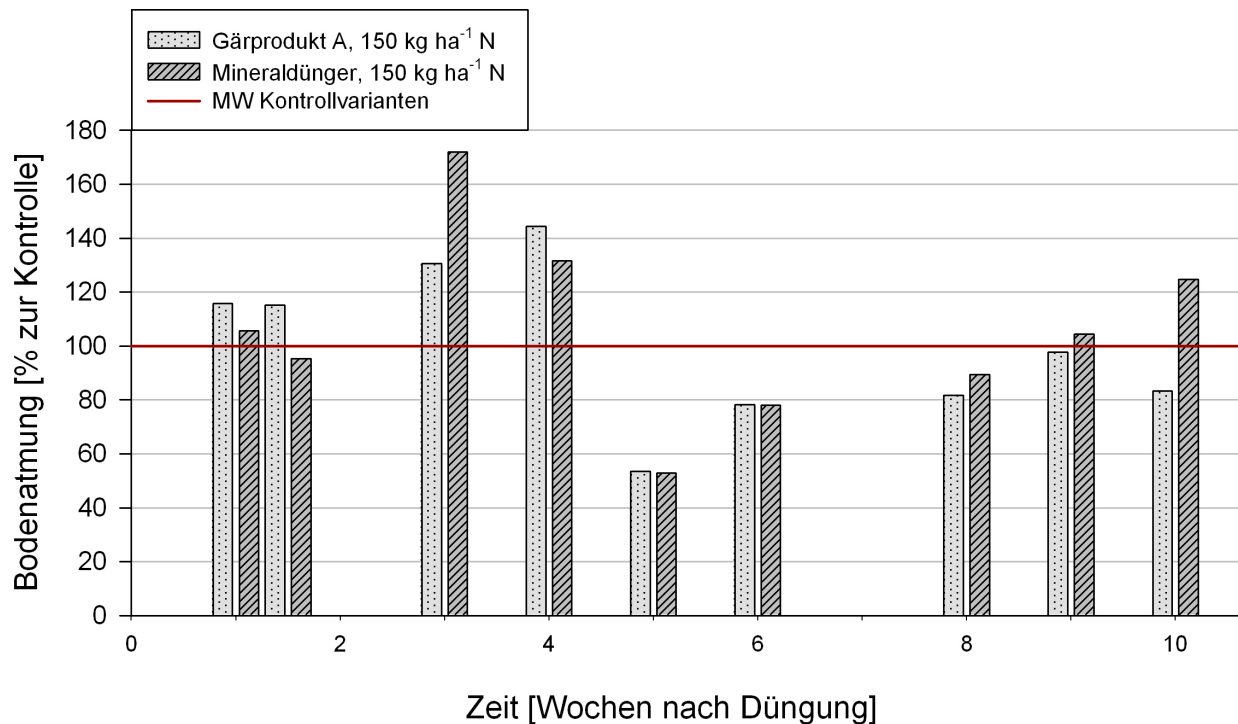
Variante	Bodenatmung [g CO ₂ m ⁻² h ⁻¹]											
Kontrolle	0,43 ^a	0,27 ^a	0,51 ^a	0,71 ^a	0,58 ^a	0,97 ^a	0,59 ^a	0,69 ^a	0,54 ^a	0,40 ^a	0,64 ^a	
GP A	0,32 ^a	0,34 ^a	0,63 ^a	0,86 ^a	0,57 ^a	0,87 ^a	0,61 ^a	0,67 ^a	0,57 ^a	0,41 ^a	0,55 ^a	
MD	0,20 ^a	0,18 ^a	0,39 ^a	0,50 ^a	0,44 ^a	0,70 ^a	0,59 ^a	0,56 ^a	0,43 ^a	0,32 ^a	0,43 ^a	

Abbildung 4-3: Zeitlicher Verlauf der Bodenatmung unter Silomais nach Gärprodukt- bzw. Mineraldüngung (ca. 150 kg ha⁻¹ N) im Jahr 2006; Grafik: Werte in Prozent vom Mittelwert der Kontrollvarianten, Tabelle: gemessene Bodenatmung [g CO₂ m⁻² h⁻¹]

Mittelwerte mit gleichen Buchstaben innerhalb eines Messtermins unterscheiden sich nicht signifikant voneinander, Tukey-Test mit $\alpha = 0,05$; n = 2

Der Verlauf der Bodenatmung der beiden Düngervarianten unterschied sich deutlich von dem Verlauf der Messungen unter Sommerweizen. Während der Effekt der Mineraldüngung auf die Bodenatmung über den gesamten Zeitraum negativ war, wurde 6 bis 8 Wochen nach Applikation eine positive Wirkung der Düngung mit GP A mit einer Steigerung der Bodenatmung um etwa 20 % gemessen. In der 9. bis 16. Woche nach der Düngerausbringung war die Bodenatmung in den mit GP A gedüngten und den ungedüngten Parzellen etwa gleich hoch. In der mineralisch gedüngten Variante blieb die Bodenatmung in diesem Zeitraum weiterhin um bis zu 32 % verringert gegenüber der Kontrollvariante.

Im Jahr **2007** wurde die Bodenatmung unter Silomais 1 bis 10 Wochen nach der Düngung gemessen (Abbildung 4-4).



Variante	Bodenatmung [g CO ₂ m ⁻² h ⁻¹]								
Kontrolle	0,11 ^a	0,13 ^a	0,20 ^a	0,30 ^a	1,08 ^a	0,41 ^a	0,91 ^a	0,78 ^a	0,55 ^a
GP A	0,13 ^a	0,15 ^a	0,26 ^a	0,43 ^a	0,58 ^a	0,32 ^a	0,74 ^a	0,76 ^a	0,46 ^a
MD	0,12 ^a	0,12 ^a	0,34 ^a	0,39 ^a	0,57 ^a	0,32 ^a	0,81 ^a	0,81 ^a	0,69 ^a

Abbildung 4-4: Zeitlicher Verlauf der Bodenatmung unter Silomais nach Gärprodukt- bzw. Mineraldüngung (ca. 150 kg ha⁻¹ N) im Jahr 2007; Grafik: Werte in Prozent vom Mittelwert der Kontrollvarianten, Tabelle: gemessene Bodenatmung [g CO₂ m⁻² h⁻¹]

Mittelwerte mit gleichen Buchstaben innerhalb eines Messtermins unterscheiden sich nicht signifikant voneinander, Tukey-Test mit $\alpha = 0,05$; n = 2

Der Verlauf der Bodenatmung zeigte keinen eindeutigen Trend oder einen Peak nach der Gärproduktdüngung, wie es bei der Bodenatmung im Sommerweizenfeld im selben Jahr der Fall war. Die Bodenatmung in den beiden Düngevarianten zeigte an den meisten Messterminen einen einheitlichen Verlauf gegenüber der Kontrolle. Hierbei waren die Effekte durch Düngung in den ersten 4 Wochen meist positiv, von der 5. bis zur 10. Woche zeigten sich dagegen bei beiden Düngern negative Wirkungen auf die Bodenatmung mit Verringerungen bis zu 47 %.

Im Feldversuch kann Düngung die Bodenmikroorganismen direkt und indirekt beeinflussen. Eine direkte Förderung oder Hemmung der Mikroorganismen durch die Düngung ist durch die Zufuhr organischer Substanz oder hemmender Stoffe im Dünger selbst bedingt. Eine indirekte Förderung der Mikroorganismen kann durch die Wirkung des Düngers auf die Pflanzen auftreten. Düngung kann die Bildung von Pflanzen- und Wurzelbiomasse sowie die Ausscheidung von Wurzelexsudaten durch die Pflanzen erhöhen. Diese Faktoren können durch die Erhöhung des Nahrungsangebotes für die Mikroorganismen deren Aktivität erhöhen. Diese indirekten Wirkungen können in einem Laborexperiment ohne Pflanzen, wie es im Folgenden beschrieben wird, ausgeschlossen werden.

Bodenatmung und Methanemissionen im Modellversuch

In einem Bodensäulenversuch wurden die CO_2 - bzw. CH_4 -Emissionen von den mit Mineraldünger bzw. mit GP A versetzten Bodenproben ($0,2 \text{ g kg}^{-1} \text{ N}$) im Vergleich zu unbehandeltem Boden 19 Tage lang gemessen. Die Ergebnisse der kumulierten Kohlenstoffmengen aus CO_2 bzw. CH_4 sind in Abbildung 4-5 dargestellt.

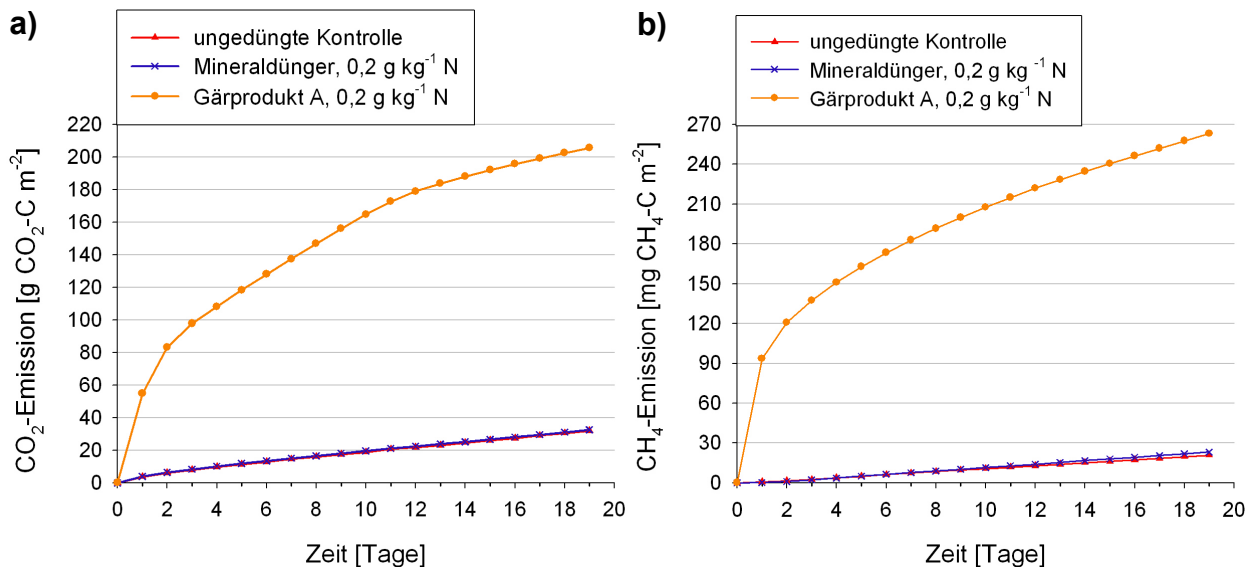


Abbildung 4-5: a) CO_2 -C-Abgabe (kumuliert) bzw. b) CH_4 -Abgabe (kumuliert) eines Boden-Gärprodukt-Gemisches im Vergleich zu einem Boden-Mineraldünger-Gemisch und einer unbehandelten Bodenprobe über 19 Tage im Bodensäulen-Modellversuch; $n = 3$

Im Gegensatz zur Bodenatmung im Feld unterschieden sich im Modellversuch die CO_2 -Emissionen der mit Mineraldünger versetzten Bodenproben und der ungedüngten Kontrolle über den gesamten Zeitraum nicht voneinander (Abbildung 4-5a). Vom Kontrollboden wurden über 19 Tage ca. $32 \text{ g m}^{-2} \text{ C}$ in Form von CO_2 abgegeben, bei der Mineraldünger-Variante war dies mit $33 \text{ g m}^{-2} \text{ CO}_2\text{-C}$ nur geringfügig mehr. Die CO_2 -Abgabe der Gärprodukt-Variante war in den ersten 3 Tagen sehr hoch und nahm danach mit jedem Tag deutlich ab. In 19 Tagen wurden von dieser Variante $206 \text{ g m}^{-2} \text{ CO}_2\text{-C}$ abgegeben, also mehr als das 6-Fache der anderen Varianten.

Die Kohlenstoffmenge, die in Form von Methan aus dem Boden entwich, war zwar relativ gering im Vergleich zur abgegebenen Menge aus CO_2 . Die Wirksamkeit von Methan als Treibhausgas ist jedoch mit einem relativen Treibhausgaspotenzial von 21, bezogen auf CO_2 und 100 Jahre (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), 1995), relativ groß. Dadurch sind auch geringere Emissionen umweltrelevant. Der Verlauf der Methanabgabe aus den Boden-Dünger-Gemischen ist ähnlich dem Verlauf der Kohlendioxidabgabe (Abbildung 4-5b). Die Kontrolle und die Mineraldünger-Variante gaben über den Zeitraum von 19 Tagen insgesamt 21

(Kontrolle) bzw. 23 mg m⁻² CH₄-C (Mineraldünger-Variante) ab. Die Gärprodukt-Variante lag mit einer Abgabe von 263 mg m⁻² CH₄-C um das 11- bis 13-Fache darüber.

Der aus der Kontrollvariante emittierte Kohlenstoff stammt aus „alter“ Bodensubstanz. Aus diesem Grund muss zur Berechnung des Kohlenstoffanteils, der aus dem Gärproduktkohlenstoff vom Boden-Dünger-Gemisch abgegeben wurde, die von den Kontrollvarianten emittierte Kohlenstoffmenge (aus CO₂ und CH₄) von der Emission der Gärproduktvariante abgezogen werden. Nach dieser Berechnung werden im Mittel über die Gärprodukt-Varianten noch 1,36 g C innerhalb von 19 Tagen nach Düngergabe von den Boden-Dünger-Gemischen abgegeben. Das entspricht 31 % des durch das Gärprodukt eingebrachten Kohlenstoffs (4,41 g C Gefäß⁻¹), wobei der Anteil des CH₄-C davon < 0,1 % beträgt.

4.1.3 Abundanz, Biomasse und Artenverteilung von Regenwürmern

Zur Untersuchung der Effekte von Gärprodukten auf Regenwürmer wurden zum einen einzelne Parzellen des Sommerweizenversuchs in Berlin-Dahlem im Jahr 2007 auf die Regenwurm-Abundanz untersucht und zum anderen Vermeidungstests im Labor mit der Regenwurmart *Eisenia fetida* durchgeführt (GRUNER, 2008). In allen Versuchen kam beispielhaft ausschließlich GP A zum Einsatz.

Regenwurmaktivität im Feld

Bei der Untersuchung der Regenwurmabundanz im Feld wurden im Durchschnitt 122 Tiere m⁻² gefunden (Tabelle 4-2), was für diesen sandigen Standort relativ hohe Besatzzahlen sind. Eine Erklärung für die hohe Regenwurmdichte in diesem Jahr könnten die relativ hohen Niederschläge von Januar bis März sein.

Tabelle 4-2: Abundanz, Altersstufe und Masse der Regenwürmer in Abhängigkeit von der N-Stufe aus Gärprodukt A im Feldversuch mit Sommerweizen im Jahr 2007

Mittelwerte mit gleichen Buchstaben innerhalb eines Parameters unterscheiden sich nicht signifikant voneinander, Tukey-Test mit $\alpha = 0,05$; n = 4

N-Aufwand- menge [kg ha ⁻¹ N]	Abundanz [Anzahl m ⁻²]	Adulte [Anzahl m ⁻²]	Juvenile [Anzahl m ⁻²]	Masse [g m ⁻²]	Masse [g Tier ⁻¹]
0	148 ^a	29 ^a	109 ^a	41,8 ^a	0,29 ^a
50	117 ^a	19 ^a	92 ^a	33,1 ^a	0,28 ^a
100	114 ^a	18 ^a	92 ^a	30,7 ^a	0,26 ^a
150	108 ^a	26 ^a	74 ^a	37,8 ^a	0,34 ^a
Mittelwert	122	23	92	35,9	0,29

Die ungedüngte Kontrolle hatte mit einem Mittelwert von 148 Tieren m⁻² den höchsten Besatz. Die Regenwurmabundanz nahm mit steigender N-Aufwandmenge ab. Der Rückgang der Abundanz durch Düngung gegenüber der Kontrolle betrug 21 % bei der geringsten Aufwandmenge,

23 % bei $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ und 27 % bei einer N-Aufwandmenge von 150 kg ha^{-1} . Diese Unterschiede waren jedoch nicht signifikant. Bei der Bestimmung der Altersstufen wurden im Durchschnitt 23 adulte und 92 juvenile Regenwürmer je Quadratmeter gezählt. Die Anzahl der Juvenilen nahm mit steigender Aufwandmenge ab. Demgegenüber stieg die Zahl der adulten Regenwürmer von den mit 50 und $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ gedüngten Parzellen zu denen mit der N-Aufwandmenge 150 kg ha^{-1} . Beim Vergleich der höchsten N-Aufwandmenge mit der Kontrolle nahm die Anzahl der juvenilen Tiere durch die Düngung deutlich stärker ab als die der adulten Würmer. So betrug die Reduktion der Adulten 10 %, die Juvenilen wurden demgegenüber um 32 % reduziert. Signifikante Unterschiede gab es bei diesen Ergebnissen jedoch ebenfalls nicht. Die Regenwurmmasse je Fläche lag ebenfalls in allen gedüngten Varianten unter dem Wert der Kontrollparzellen. Die Abnahmen der Masse durch Gärproduktdüngung betrugen 21 ($50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$), 27 ($100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$) und 10 % ($150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$). Die durchschnittliche Masse je Tier war mit $0,34 \text{ g Tier}^{-1}$ bei der N-Aufwandmenge 150 kg ha^{-1} am höchsten. Dies entspricht einer Zunahme von 17 % gegenüber der Kontrolle. Bei den Aufwandmengen 50 und $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ nahm die durchschnittliche Masse je Tier demgegenüber geringfügig ab (um 3 bzw. 10 %). Die Unterschiede zwischen den Werten waren in keinem Fall signifikant. Der durch die anderen Parameter angedeutete Trend der negativen Korrelation mit der N-Aufwandmenge bestätigte sich durch den Parameter „Masse je Tier“ somit nicht.

Im Wesentlichen wurden zwei Arten Regenwürmer gefunden: Die für Ackerböden typische Art *A. caliginosa* sowie *A. icterica*, von deren Vorkommen in den Gebieten Berlin, Brandenburg und Sachsen bisher nicht berichtet wurde (KRÜCK, 2009). Würmer, die nicht eindeutig bis zur Art bestimmbar waren, wurden mit *A. species* gelistet. Anektische Arten wurden nicht gefunden. Durch den Formalinaustrieb erhöhte sich hauptsächlich die Anzahl an Regenwürmern der Art *A. icterica*, jedoch auch nur um wenige Individuen. Im Feldversuch wurde *A. icterica* mit einem durchschnittlichen Anteil von über 50 % relativ häufig gefunden (Abbildung 4-6).

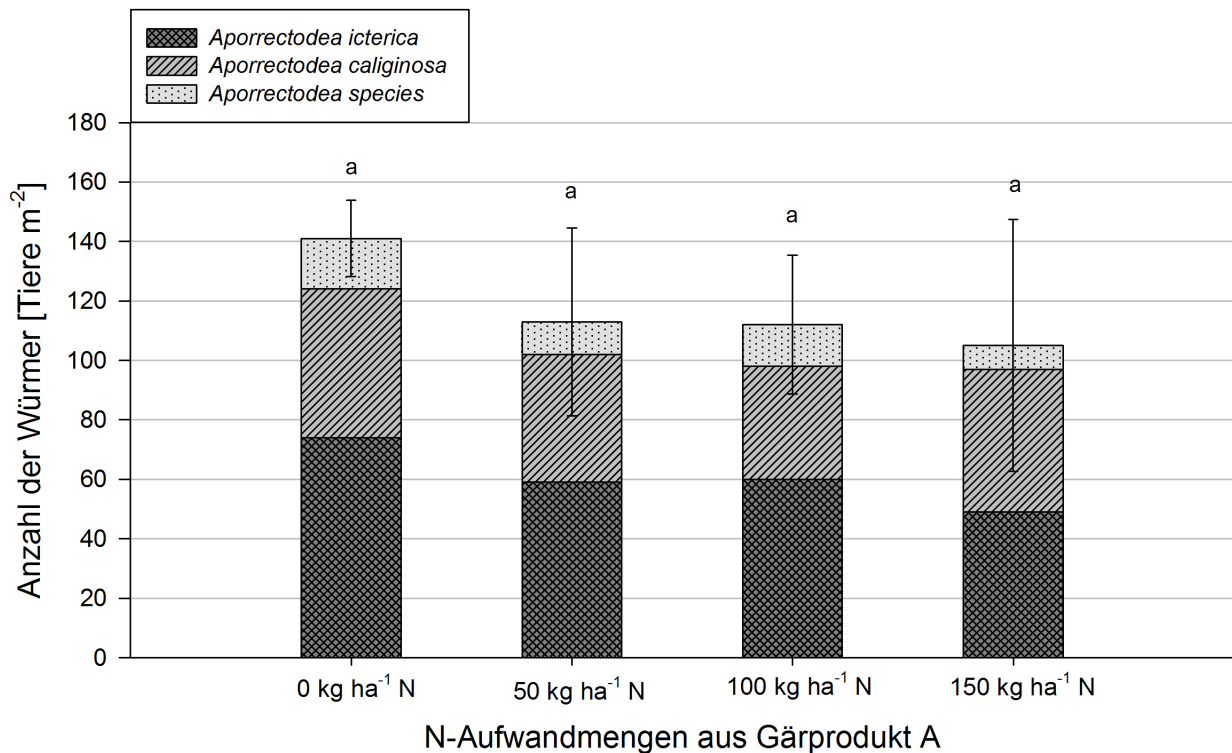


Abbildung 4-6: Artenverteilung der Regenwürmer in Abhängigkeit von der N-Aufwandmenge aus Gärprodukt A im Feldversuch mit Sommerweizen im Jahr 2007

Mittelwerte \pm Standardabweichungen der Gesamtabundanz; Gesamtmittelwerte mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant voneinander, Tukey-Test mit $\alpha = 0,05$, $n = 4$

Mit steigender N-Aufwandmenge nahm die Abundanz der Art *A. icterica* stärker ab als die von *A. caliginosa*. Die höchste N-Stufe führte bei der Art *A. icterica* zu einer Verringerung der Regenwurmanzahl um 34 %. Die Reduktion bei der Art *A. caliginosa* betrug 4 %. Ein Zusammenhang zwischen der Wirkung des Gärproduktes und der Aufwandmenge konnte bei *A. caliginosa* nicht nachgewiesen werden. Die maximale Reduktion der Anzahl der Würmer wurde mit -24 % bei der Aufwandmenge von 100 kg ha⁻¹ N gefunden. Somit scheinen Tiere der Art *A. icterica* empfindlicher auf die Applikation von Gärprodukten zu reagieren als Regenwürmer der Art *A. caliginosa*. Die tendenzielle Abnahme der Abundanz der beiden Arten ist jedoch nicht signifikant.

Vermeidungsverhalten von *Eisenia fetida* im Laborversuch

Im Vermeidungstest 1 mit der geringen Aufwandmenge von 6,2 g Gärprodukt je 500 g Boden befanden sich im Mittel der fünf Wiederholungen etwa 2/3 der Versuchstiere in dem mit Gärprodukt behandelten Prüfboden, was einer Vermeidung von -28 %, also einer Bevorzugung des Prüfbodens entspricht (Tabelle 4-3). Somit gab es bei dieser Aufwandmenge keinen Hinweis auf eine toxische Wirkung bzw. ein Gefährdungspotenzial von Gärprodukten auf Regenwürmer.

Tabelle 4-3: Durchschnittliche Anzahl von Würmern (*E. fetida*) im Kontroll- bzw. Prüfboden im Rahmen von Vermeidungstests sowie berechnete Vermeidung des Prüfbodens (ausgehend von einer 50:50-Verteilung); n = 5

Test	Durchschnittliche Anzahl der Tiere		Vermeidung [%]
	im Kontrollboden	im Prüfboden	
Vermeidungstest 1	3,6	6,4	-28
Vermeidungstest 2	9,8	0,2*	100

* entspricht einem Regenwurm, welcher verendet war – dies wird als Vermeidung gewertet

Nach einer Erhöhung der Dosis auf 30,6 g Gärprodukt je 500 g Boden im Vermeidungstest 2 wurde von den insgesamt 50 Versuchstieren aller Wiederholungen nur eines im Prüfboden gefunden, welches verendet war. Da Mortalität als Vermeidung gewertet wird (HUND-RINKE & WIECHERING, 2001), lag eine 100%ige Vermeidung des Prüfbodens und demzufolge ein Gefährdungspotenzial für Regenwürmer durch Gärprodukte in dieser Aufwandmenge vor.

4.2 Wirkungen der Gärproduktdüngung auf Kulturpflanzen

Im folgenden Abschnitt werden die Unterschiede der Gärprodukte bezüglich ihrer Wirkungen auf die Wachstums- und Entwicklungsverläufe, die Erträge und Qualitätsparameter der Ernteprodukte von Sommerweizen und Silomais in den Parzellenfeldversuchen sowie die Ergebnisse der Praxisfeldversuche dargestellt.

Um trotz der zu hoch ausgebrachten Gärproduktmengen in den Parzellenfeldversuchen im Jahr 2006 einen annähernden Vergleich der Düngerwirkungen durchführen zu können, werden für dieses Jahr die N-Stufen miteinander verglichen, die am ehesten der 150 kg ha⁻¹ N-Variante entsprechen (s. Tabelle 3-6).

4.2.1 Wachstum und N-Versorgungsstatus von Sommerweizen und Silomais

In den Parzellenfeldversuchen wurde das Wachstum von Sommerweizen und Silomais anhand der Pflanzenlänge sowie des Blattflächenindex (BFI) bestimmt. Der N-Versorgungsstatus der Pflanzen wurde indirekt über Messungen der Blattgrünfärbungen als Maß für den Chlorophyllgehalt der Blätter mittels Yara N-Tester überprüft. Die Messungen wurden mit einigen Ausnahmen einmal pro Woche während der Wachstumsphasen der Pflanzen durchgeführt. Im Folgenden werden die Ergebnisse der 150 kg ha⁻¹ N-Varianten sowie der Kontrollvarianten dargestellt.

Sommerweizen

Die **Pflanzenlänge** des Sommerweizens wurde in beiden Versuchsjahren von der 22. bis zur 26. KW gemessen (Abbildung 4-7a und b). Der am 13. April 2006 ausgesäte Sommerweizen wies zum ersten Messtermin am 1. Juni (22. KW) im Mittel über alle Parzellen eine Pflanzenlänge von 37 cm auf. Die maximale Pflanzenlänge wurde sowohl in der Kontrollvariante als

auch in allen Düngevarianten gleichzeitig in der 25. KW erreicht und betrug im Mittel über die Parzellen 82 cm (Abbildung 4-7a). Die gedüngten Bestände waren zu allen Zeitpunkten größer als die Pflanzen der ungedüngten Kontrollvariante, die Längenunterschiede waren jedoch nur für die Mineraldüngervariante durchgehend signifikant. Nachweisbare Unterschiede in den Pflanzenlängen zwischen den gedüngten Beständen gab es nur in der 24. KW. Hier waren die mineralisch gedüngten Pflanzen signifikant länger als die mit GP B und C gedüngten Pflanzenbestände. Die Differenz zwischen den Pflanzenlängen der Kontrollvarianten und der gedüngten Varianten war bereits in der 23. KW am größten, danach näherten sich die Bestände in der Höhe wieder an.

Im Jahr **2007** wies der Weizen durch den etwa 2 Wochen früheren Aussaattermin (30. März) zum ersten Messtermin am 1. Juni mit 49 cm im Mittel über alle Parzellen einen etwas größeren Bestand auf als im Jahr 2006 (Abbildung 4-7b). Wahrscheinlich bedingt durch den Entwicklungsvorsprung sowie die extreme Trockenheit im April setzte die Blüte bereits in der 24. KW ein, womit das Längenwachstum der Weizenpflanzen mit durchschnittlich nur 61 cm in allen Varianten in der gleichen Woche beendet war. Die Düngung mit $150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ erhöhte bei allen Düngern fast durchgehend die Pflanzenlänge signifikant im Vergleich zur Kontrolle. Ausnahmen waren die Varianten GP B und C in der 23. KW sowie GP A und B in der 25. KW. Anders als im Vorjahr waren die mineralisch gedüngten Pflanzen durchgehend ca. 3 bis 14 cm länger als die mit Gärprodukten gedüngten, wobei diese Unterschiede nur in der 22. KW für alle Gärprodukte signifikant waren. Zwischen den Gärproduktvarianten waren kaum Längenunterschiede erkennbar. Die Differenzen der Pflanzenlängen in den gedüngten Varianten zu denen in den Kontrollvarianten waren maximal in der 22. bzw. 23. KW und verringerten sich anschließend in allen Varianten wieder.

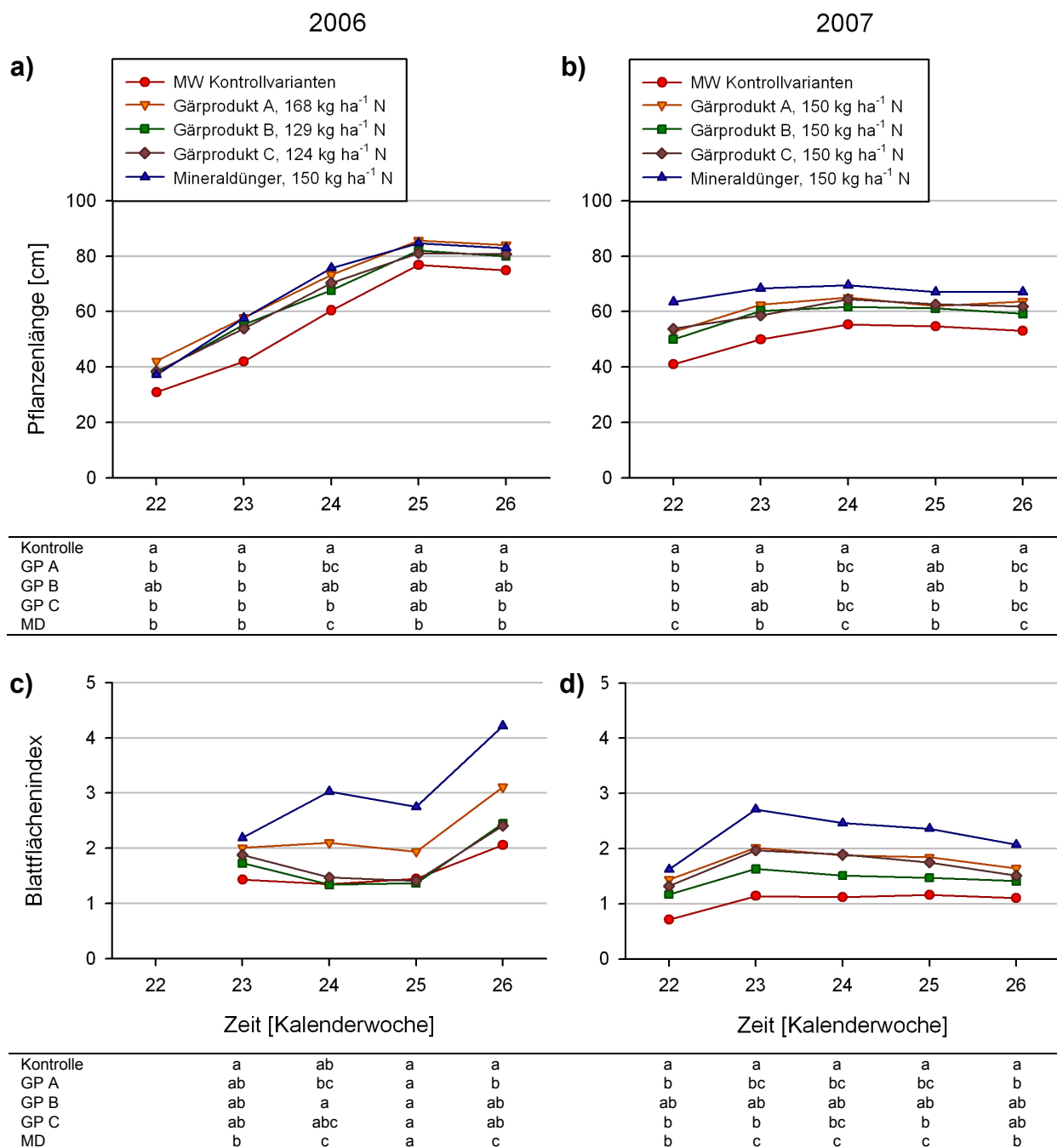


Abbildung 4-7: Zeitlicher Verlauf des Sommerweizenwachstums anhand der Pflanzenlänge a) im Jahr 2006 und b) im Jahr 2007 sowie anhand des Blattflächenindex c) im Jahr 2006 und d) im Jahr 2007 in Abhängigkeit von der Düngerart im Vergleich zur Kontrolle

Graphisch dargestellt sind die Mittelwerte aus den vier Kontrollvarianten, die statistische Auswertung erfolgte für jede Variante mit der dazugehörigen Kontrolle; Mittelwerte mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant voneinander, Tukey-Test mit $\alpha = 0,05$ / Auswertung mittels Rangverfahren 5 %: Pflanzenlänge 2006, 24. KW; Pflanzenlänge 2007, 25. KW; Blattflächenindex 2006, 24. KW; n = 4

Der **Blattflächenindex** (BFI) gibt die einseitige Blattoberfläche eines Pflanzenbestandes je Bodenoberfläche an und kann ebenfalls zur Bestimmung des Pflanzenwachstums herangezogen werden. Im Jahr **2006** wurde er über 4 Wochen von Anfang bis Ende Juni gemessen, in denen er von 1,9 in der 23. bis 25. KW auf 2,8 in KW 26 im Mittel über alle Parzellen anstieg (Abbildung 4-7c). Einen signifikant höheren BFI als die jeweilige Kontrollvariante wiesen nur die

mineralisch gedüngte (außer in der 25. KW) sowie die mit GP A gedüngte Variante in der 26. KW auf. Zwischen den gedüngten Beständen waren größere Unterschiede als bei den Messungen der Pflanzenlänge erkennbar, wobei der BFI der Variante GP A über denen der anderen Gärprodukt-Varianten lag. Alle mit Gärprodukten gedüngten Bestände wiesen jedoch einen niedrigeren BFI als die mineralisch gedüngten Bestände auf. Nachweisbare Unterschiede im BFI zwischen den gedüngten Varianten traten in der 24. KW auf. Hier war der BFI der mit Mineraldünger sowie mit GP A gedüngten Pflanzen signifikant höher als jener der mit GP B gedüngten Pflanzen. Beim letzten Messtermin war der BFI der MD-Variante signifikant höher als der aller Gärprodukt-Varianten.

Im Jahr **2007** unterschied sich der zeitliche Verlauf des BFI stark von dem im Vorjahr. Der maximale Wert wurde mit 1,6 im Mittel über alle Parzellen bereits in der 23. KW erreicht, danach wurde eine leichte Abnahme des BFI bei allen gedüngten Varianten gemessen (Abbildung 4-7d). Der Verlauf ähnelte jedoch dem der Pflanzenlänge im gleichen Jahr, bei der ebenfalls relativ früh keine steigenden Werte mehr gemessen wurden. Der BFI des mit GP B gedüngten Bestandes unterschied sich zu keinem Zeitpunkt signifikant von dem des zugehörigen Kontrollbestandes, während die Werte der anderen Düngervarianten fast durchgehend signifikant höhere Werte gegenüber der Kontrollvariante aufwiesen. Nachweisbare Unterschiede zwischen den BFI der MD- und der GP B-Variante bestanden in den KW 23 bis 25. Der mit GP C gedüngte Bestand wies in den Wochen 23 und 25 ebenfalls einen signifikant geringeren BFI als der mineralisch gedüngte Bestand auf. Wie bei der Pflanzenlänge waren die Differenzen der BFI aller gedüngten Varianten zu denen der Kontrollvarianten in der 23. KW am größten und nahmen anschließend wieder ab.

Die mit dem N-Tester ermittelten **Blattgrünwerte** sind dimensionslose Zahlen. Da die absoluten Ergebnisse der Messungen stärkeren Schwankungen unterlegen sind, wurden die gemessenen Werte zum besseren Vergleich der Düngervarianten relativ in Prozent zur ungedüngten Kontrolle dargestellt (Abbildung 4-8). Die realen Werte lagen zwischen 400 und 800.

Beim Sommerweizen wurde das Blattgrün im Jahr **2006** über 8 Wochen von Mitte Mai bis Ende Juni (KW 19 bis 26) gemessen, wobei die gedüngten Pflanzen durchgehend grünere Blätter aufwiesen als die Kontrollvarianten (Abbildung 4-8a). An den ersten beiden Messterminen gab es noch keine eindeutigen Tendenzen. Ab der 21. KW unterschieden sich die Blattgrünwerte der GP A- sowie der MD-Variante fast durchgehend signifikant von denen der zugehörigen Kontrollvarianten, die der Varianten GP B und C demgegenüber nur vereinzelt. Im gleichen Zeitraum war der Wert für die MD-Variante zum Teil signifikant höher als die der Gärprodukt-Varianten, so in der 21. und 22. KW gegenüber der Variante GP B und in den Wochen 23, 24 und 26 gegenüber allen drei Gärprodukt-Varianten. Insbesondere in den ersten 4 Wochen waren die Blattgrünwerte der GP A-Variante tendenziell höher als die der anderen Gärprodukt-Varianten, zum Ende des Messzeitraums glichen sich die Werte einander an. Die maximalen Differenzen zu

den Blattgrünwerten der Kontrollvarianten erreichten alle gedüngten Varianten in der 23. KW, bis zur Ernte näherten sich die Werte der gedüngten und der ungedüngten Varianten wieder an.

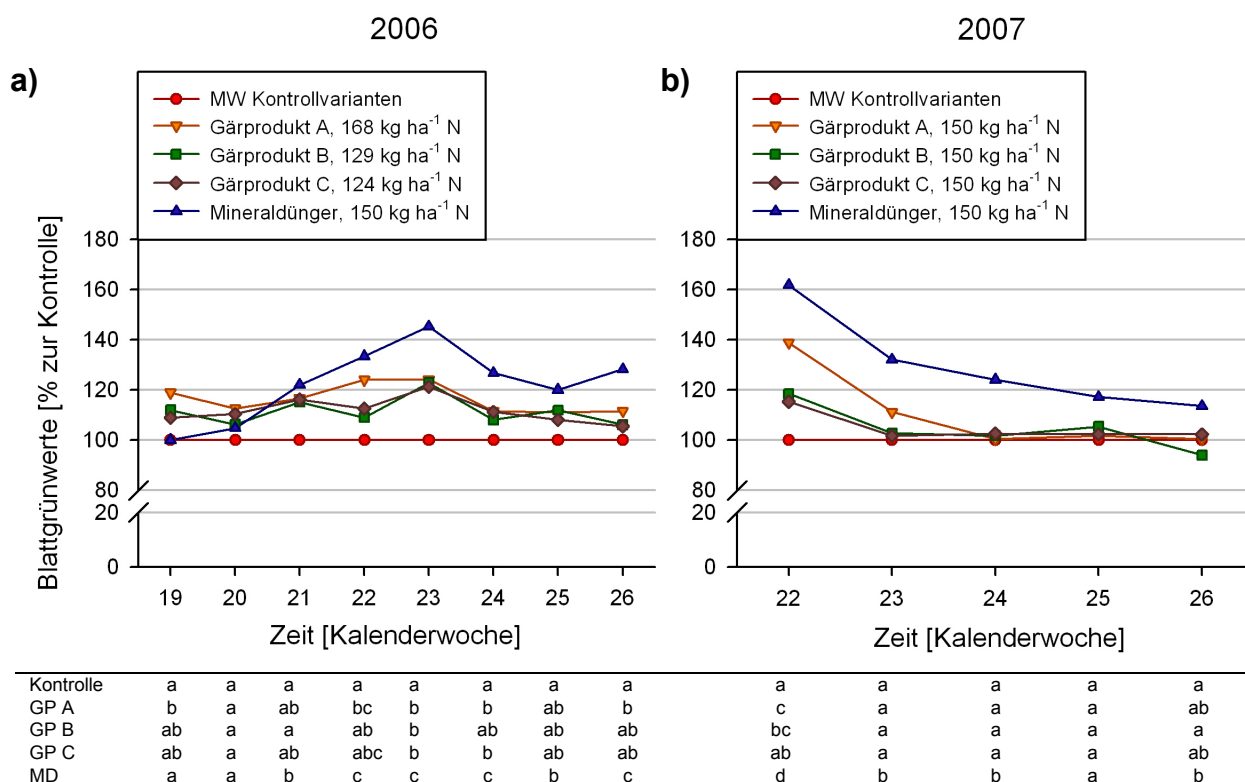


Abbildung 4-8: Zeitlicher Verlauf der Blattgrünwerte des Sommerweizens relativ zur ungedüngten Kontrolle (Mittelwert) a) im Jahr 2006 und b) im Jahr 2007 in Abhängigkeit von der Düngung

Graphisch dargestellt sind die Mittelwerte aus den vier Kontrollvarianten, die statistische Auswertung erfolgte für jede Variante mit der dazugehörigen Kontrolle; Mittelwerte mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant voneinander, Tukey-Test, $\alpha = 0,05$ / Auswertung mittels Rangverfahren 5 %: 2006, 21. KW; $n = 4$

Im Jahr **2007** wurde mit den Messungen des Blattgrüns erst in der 22. KW begonnen (Abbildung 4-8b). Wie im Vorjahr im gleichen Zeitraum näherten sich die Werte der gedüngten Pflanzen im Verlauf der 5 Wochen den Werten der ungedüngten Kontrollpflanzen an. Die maximalen Differenzen wiesen die Blattgrünwerte der Kontrollvarianten zu denen der gedüngten Varianten in der 22. KW auf. Nur die Werte der MD-Variante unterschieden sich fast durchgehend von denen der zugehörigen Kontrollvariante, die der GP A- und B-Varianten vereinzelt. Der mineralisch gedüngte Bestand wies an den ersten 3 Messterminen noch signifikant höhere Blattgrünwerte auf als alle mit Gärprodukten gedüngten Bestände. Zwischen den mit Gärprodukten gedüngten Pflanzen gab es bezüglich des Blattgrüns nur einen signifikanten Unterschied: In der 22. KW hatten die mit GP A gedüngten Pflanzen signifikant höhere Blattgrünwerte als die mit GP C gedüngten.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass die zeitlichen Verläufe der Wachstumsparameter und des Blattgrüns in den mit Gärprodukten gedüngten Beständen denen in den mineralisch gedüngten Beständen stark ähnelten, sich jedoch auf einem niedrigeren Niveau befanden. Eine

zeitlich verzögerte Düngwirkung der Gärprodukte durch die organisch gebundenen Nährelemente war somit nicht zu erkennen. Unterschiede durch Unregelmäßigkeiten in der Düngung wie die späte Mineraldüngergabe und die hohe GP A-Gabe im Jahr 2006 waren nur zu Beginn der Vegetationsperiode messbar. Die Wirkungen der Gärproduktgaben auf die jeweils gemessenen Parameter waren fast durchgehend am stärksten beim GP A gefolgt von GP C, die geringste Wirkung auf das Wachstum und den N-Versorgungsstatus der Pflanzen wies in der Regel GP B auf.

Silomais

Mit den Messungen der **Pflanzenlänge** des am 28. April **2006** ausgesäten Silomaises wurde in diesem Jahr erst Ende Juni (26. KW), also relativ spät begonnen. Zu diesem Zeitpunkt wies der Mais bereits eine Länge von 129 cm gemittelt über alle Parzellen auf (Abbildung 4-9a).

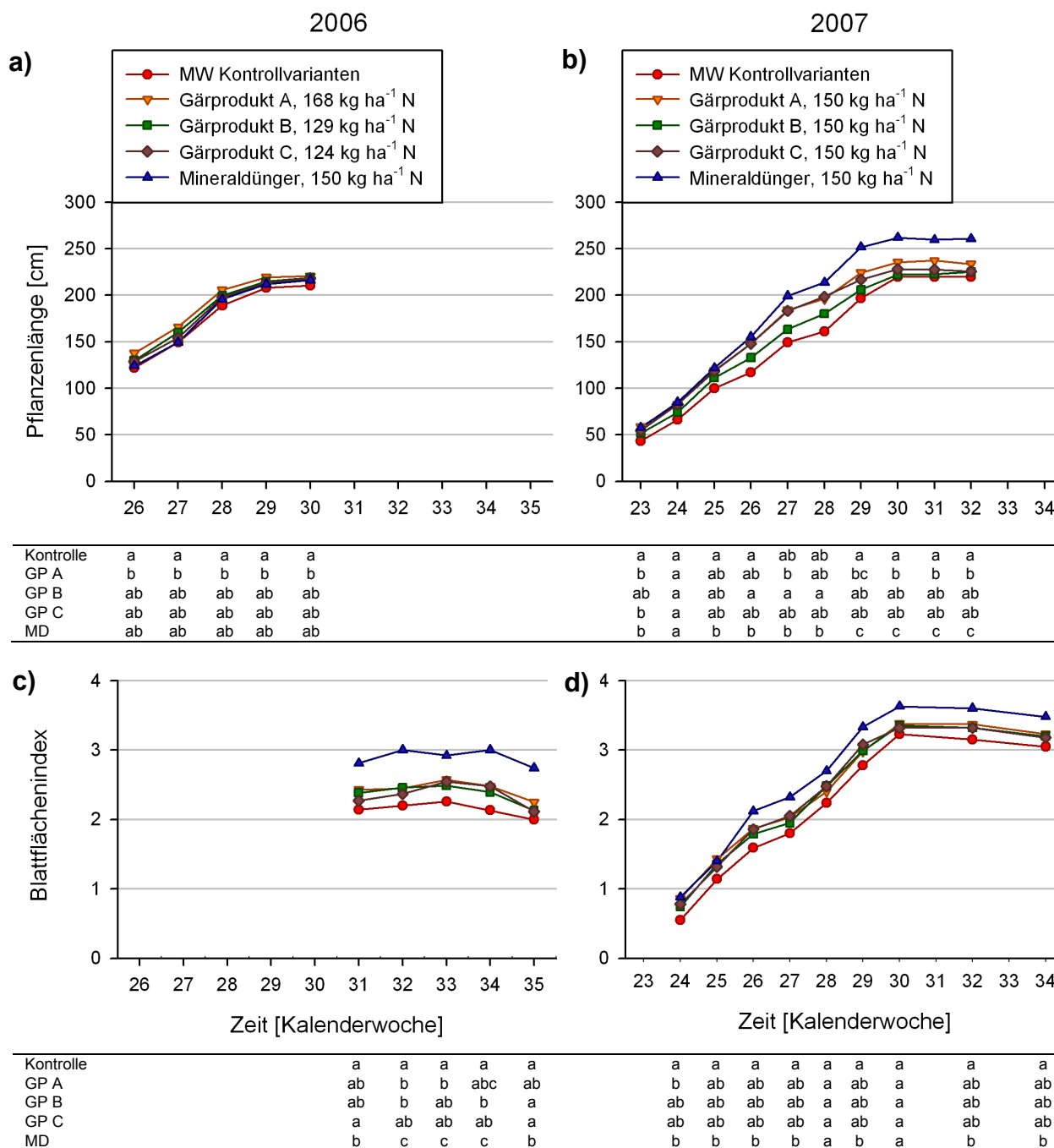


Abbildung 4-9: Zeitlicher Verlauf des Silomaiswachstums anhand der Pflanzenlänge a) im Jahr 2006 und b) im Jahr 2007 sowie anhand des Blattflächenindex c) im Jahr 2006 und d) im Jahr 2007 in Abhängigkeit von der Düngerart im Vergleich zur Kontrolle

Graphisch dargestellt sind die Mittelwerte aus den vier Kontrollvarianten, die statistische Auswertung erfolgte für jede Variante mit der dazugehörigen Kontrolle; Mittelwerte mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant voneinander, Tukey-Test mit $\alpha = 0,05$ / Auswertung mittels Rangverfahren 5 %: Pflanzenlänge 2007, KW 23-28; Blattflächenindex 2006, KW 32-34; $n = 4$

Aufgrund des Erreichens der maximalen Länge in der 29. KW in allen Varianten, welche im Mittel der Parzellen 214 cm betrug, fand Ende Juli, in der 30. KW, die letzte Messung statt. Somit blieb der Maisbestand insgesamt sehr niedrig. Das ist wahrscheinlich auf den sehr trockenen Juni zurückzuführen. Zwischen den Behandlungen waren kaum Unterschiede in der Größe der

Pflanzenbestände erkennbar. Ein signifikanter Längenunterschied bestand durchgehend zwischen den mit GP A gedüngten Pflanzen und der zugehörigen Kontrollvariante.

Im Jahr **2007** wurde bereits Anfang Juni in der 23. KW bei einer mittleren Länge der Maispflanzen von 50 cm mit den Messungen begonnen und diese bis Anfang August (32. KW) fortgeführt. Gemittelt über alle Parzellen wurde die maximale Pflanzenlänge in der 30. KW mit 231 cm erreicht (Abbildung 4-9b). In den mit $150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ aus GP A und GP B gedüngten Beständen wurden die maximalen Pflanzenlängen erst in der 31. bzw. 32. KW gemessen, wobei der Zuwachs nach der 30. KW jeweils nur noch wenige Zentimeter betrug. Die mineralisch gedüngten Bestände waren ab der 29. KW fast durchgehend signifikant höher als die mit Gärprodukten gedüngten. Die Gärproduktvarianten unterschieden sich kaum. Signifikant größere Bestände als die zugehörigen Kontrollvarianten wiesen die Varianten GP A und MD ab der 29. KW durchgehend auf. Für die Varianten GP B und C war dies nur selten der Fall. Die maximalen Differenzen zur Pflanzenhöhe in den Kontrollvarianten wiesen die mit Gärprodukten gedüngten Pflanzen in der 28. KW auf, die mineralisch gedüngten eine Woche später.

Da die ersten Messungen des **Blattflächenindex** im Jahr **2006** fehlerhaft waren, beginnen die dargestellten Daten erst nach der Blüte, in der 31. KW und enden in KW 35 (Abbildung 4-9c). Einen signifikant höheren BFI als die Kontrolle wies der mineralisch gedüngte Bestand durchgehend, die mit GP A und B gedüngten Bestände nur vereinzelt auf. Mit Werten zwischen 2,7 und 3,0 wies der mineralisch gedüngte Bestand in allen 5 Wochen einen deutlich höheren BFI als die mit Gärprodukten gedüngten Bestände auf, deren BFI zwischen 2,1 und 2,6 lagen. Durchgehend signifikant waren diese Unterschiede nur für das GP C.

Im Jahr **2007** konnte der Zuwachs an Blattfläche genauer dokumentiert werden, da die Messperiode von der 24. bis zur 34. KW reichte (Abbildung 4-9c). Wie aufgrund der Pflanzenlängenmessungen zu erwarten war, wiesen die Maispflanzen im Jahr 2007 auch höhere maximale BFI auf. Alle Varianten erreichten den maximalen BFI in der 30. KW, in der auch die maximale Wuchslänge ermittelt wurde. Im Mittel über alle Parzellen betrug der BFI 3,4. Die MD-Variante wies fast durchgehend signifikant höhere BFI als die zugehörige Kontrollvariante auf. Für die Gärprodukte traf dies nur bei GP A in der 24. KW zu. Obwohl wie im Vorjahr ein höherer BFI des mineralisch gedüngten Bestandes ab der 26. Woche erkennbar war, unterschieden sich die gedüngten Varianten statistisch nicht voneinander. Auch die Differenzen zwischen den Werten der Kontrollvarianten zu denen der gedüngten Varianten waren vom Beginn der Messungen an relativ gleichbleibend.

Das **Blattgrün** der Maispflanzen wurde im Jahr **2006** von der 26. bis zur 33. KW durchgehend wöchentlich gemessen (Abbildung 4-10a). Anders als beim Sommerweizen stiegen die Werte gegenüber der Kontrolle im Verlauf der 8 Wochen tendenziell an. Dabei unterschieden sich die Werte der mineralisch gedüngten Pflanzen durchgehend, die der mit GP A gedüngten Pflanzen in der 28., 29. und 31. KW sowie die der mit GP B und C gedüngten Pflanzen nur jeweils an

einem Termin (32. bzw. 30. KW) signifikant von den jeweiligen ungedüngten Kontrollpflanzen. Die Variante GP C wies in den Wochen 26 bis 28 nachweisbar geringere Blattgrünwerte auf als die MD-Variante. In der 32. KW waren die Werte zusätzlich geringer als die der Variante GP B. Stärkere Schwankungen traten gegen Ende der Vegetationsperiode Mitte August auf, da hier wahrscheinlich bereits die Blattalterung einsetzte.

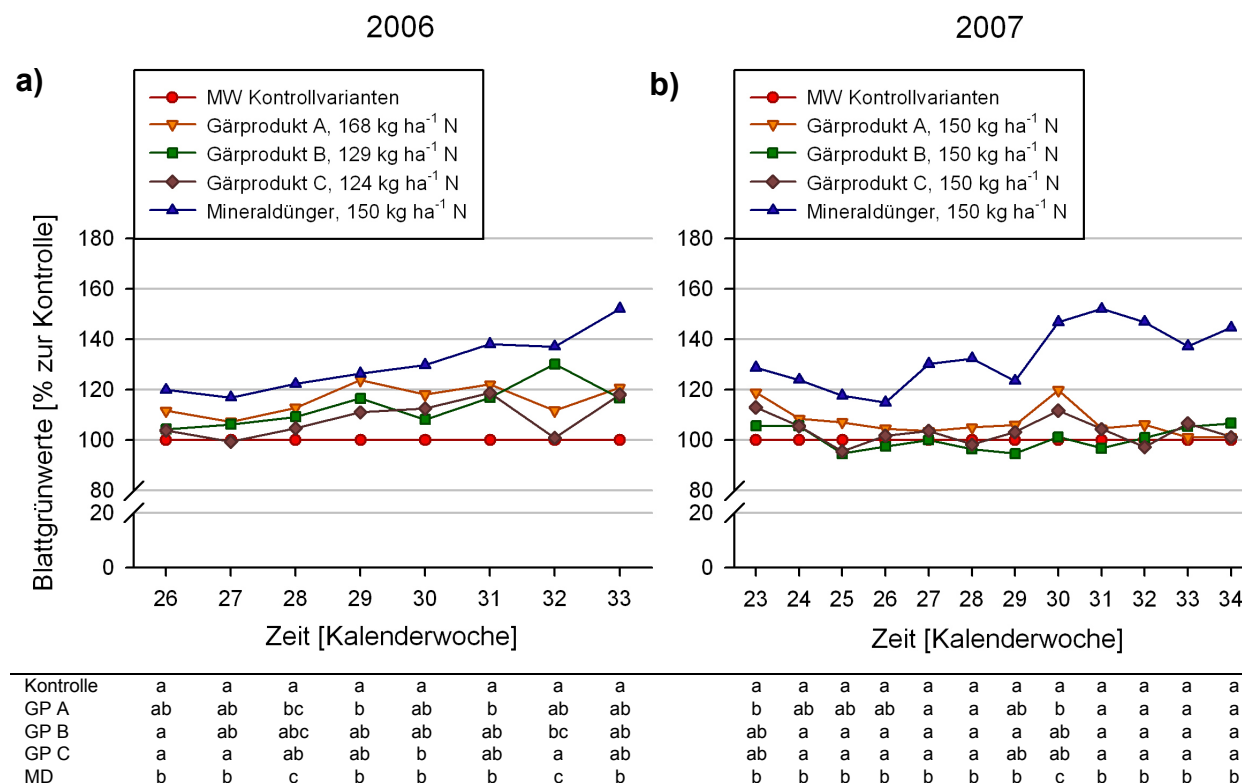


Abbildung 4-10: Zeitlicher Verlauf der Blattgrünwerte des Silomaises relativ zur ungedüngten Kontrolle (Mittelwert) a) im Jahr 2006 und b) im Jahr 2007 in Abhängigkeit von der Düngung

Graphisch dargestellt sind die Mittelwerte aus den vier Kontrollvarianten, die statistische Auswertung erfolgte für jede Variante mit der dazugehörigen Kontrolle; Mittelwerte mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant voneinander, Tukey-Test mit $\alpha = 0,05$ / Auswertung mittels Rangverfahren 5 %: Blattgrünwerte 2006, 26. und 30. KW; für Blattgrünwerte 2007, 26. KW, $n = 4$

Im zweiten Versuchsjahr **2007** wurde das Blattgrün im Mais durchgehend von KW 23 bis 34 gemessen (Abbildung 4-10b). Die Blattgrünwerte der mineralisch gedüngten Pflanzen lagen durchgehend signifikant über denen der zugehörigen Kontrollpflanzen. Die Werte der mit Gärprodukten gedüngten Pflanzen lagen in vielen Fällen sogar unter denen der Kontrollpflanzen. Signifikant höher waren die Werte demgegenüber nur vereinzelt für die GP A-Variante. Wie auch im Vorjahr hob sich die MD-Variante deutlich von den Gärprodukt-Varianten ab, so dass deren Blattgrünwerte in der 27. und 28. KW sowie von der 30. bis zur 34. KW signifikant über allen mit Gärprodukten gedüngten Varianten lagen. In den Wochen 24 bis 26 traf dies nur für die Varianten GP B und C und in der 29. Woche nur für die Variante GP B zu.

Insgesamt konnte anhand der Wachstumsparameter eine positive Wirkung der Gärprodukte auf die Maispflanzen festgestellt werden. Für das Blattgrün war dies nur im ersten Versuchsjahr

eindeutig erkennbar. Wie auch beim Weizen war die Wirkung jedoch in fast allen Fällen deutlich geringer als in der MD-Variante. Tendenziell waren die Wirkungen auf Wachstum und Blattgrün bei dem GP A stärker als bei den beiden anderen Gärprodukten. Eine schwächere Wirkung des GP B war zeitweise, wie bereits beim Sommerweizen, erkennbar.

4.2.2 Erträge und Stickstoffentzüge von Sommerweizen, Ölrettich und Silomais sowie Qualität des Sommerweizenkorns

Im folgenden Kapitel werden die Erträge sowie die Stickstoffentzüge von Sommerweizen, Ölrettich und Silomais aus den Parzellenfeldversuchen dargestellt. Des Weiteren wird auf die Qualität des Sommerweizenkorns eingegangen.

Sommerweizen und Zwischenfrucht Ölrettich

Der Feldaufgang des Sommerweizens wies zwischen den im Folgenden verglichenen Varianten in beiden Jahren keine nachweisbaren Unterschiede auf (Ergebnisse nicht dargestellt). Während der Bestandsentwicklung von Getreide wird der Kornertrag nacheinander durch die Bestockung sowie durch die Kornanlage und -ausbildung festgelegt. Durch diese Entwicklungsparameter wird die Ertragsstruktur, bestehend aus

- Bestandesdichte,
- Anzahl der Körner je Ähre und
- Tausendkornmasse,

gebildet. Da die Entwicklungsparameter zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Vegetationsverlauf den Ertrag bilden, haben die Pflanzen ein hohes Kompensationsvermögen gegenüber kurzfristig ungünstigen Umweltbedingungen. Durch die Auswertung der einzelnen Ertragsparameter sind Rückschlüsse darüber möglich, zu welchen Zeitpunkten die Bedingungen wie Witterung, Nährstoffversorgung oder Pflanzengesundheit für den Getreidebestand günstig oder ungünstig waren.

Versuchsjahr 2006

Die **Korn- und Stroherträge** des Sommerweizens lagen im Jahr 2006 in einem standorttypischen Bereich zwischen 32 und 43 dt ha⁻¹ Kornertrag (bezogen auf 86 % TS) bzw. 30 und 56 dt ha⁻¹ TM Strohertrag (Tabelle 4-4). Im Vergleich zur zugehörigen Kontrollvariante führten alle Düngemaßnahmen zu signifikanten Steigerungen der Korn- und Stroherträge außer bei der mit GP B gedüngten Variante. Die Erträge der Variante GP A lagen mit 43 dt ha⁻¹ Kornertrag bzw. 56 dt ha⁻¹ Strohertrag ähnlich hoch wie die der MD-Variante. Die Erträge der Varianten mit GP B und C waren mit 40 dt ha⁻¹ Korn- und 43 bzw. 48 dt ha⁻¹ Strohmasse etwas geringer, wobei der Strohertrag der Variante GP B signifikant niedriger als bei der mineralisch gedüngten Variante war.

Tabelle 4-4: Kornertrag (86 % TS), Strohertrag (TM) sowie Ertragsstruktur (Bestandesdichte, Kornzahl je Ähre und Tausendkornmasse (TKM)) von Sommerweizen im Jahr 2006 in Abhängigkeit von der Düngerart

Innerhalb einer Düngerart unterscheiden sich Mittelwerte mit gleichen kleinen Buchstaben bzw. innerhalb einer Aufwandmenge unterscheiden sich Mittelwerte mit gleichen großen Buchstaben nicht signifikant voneinander; Tukey-Test mit $\alpha = 0,05$ / Auswertung mittels Rangverfahren 5 %: Korn- und Strohertrag; $n = 4$

Dünger	N-Aufwand- menge [kg ha ⁻¹ N]	Kornertrag (86 % TS) [dt ha ⁻¹]	Strohertrag (TM) [dt ha ⁻¹]	Bestandes- dichte [Ähren m ⁻²]	Kornzahl je Ähre [Körner Ähre ⁻¹]	Tausend- kornmasse [g]
GP A	0	34,6 ^{a/A}	34,6 ^{a/A}	461 ^{a/A}	21,2 ^{a/A}	38,5 ^{a/A}
	168	43,2 ^{b/A}	55,7 ^{b/AB}	554 ^{a/A}	21,1 ^{a/A}	36,2 ^{a/A}
GP B	0	36,1 ^{a/A}	36,1 ^{a/A}	421 ^{a/A}	19,5 ^{a/A}	38,8 ^{a/A}
	129	40,3 ^{a/A}	43,4 ^{a/A}	467 ^{a/A}	21,6 ^{a/A}	37,8 ^{a/A}
GP C	0	34,8 ^{a/A}	33,5 ^{a/A}	410 ^{a/A}	22,1 ^{a/A}	38,7 ^{a/A}
	124	40,5 ^{b/A}	48,0 ^{b/AB}	483 ^{a/A}	22,8 ^{a/A}	37,5 ^{a/A}
MD	0	32,4 ^{a/A}	30,0 ^{a/A}	396 ^{a/A}	21,9 ^{a/A}	38,7 ^{b/A}
	150	42,7 ^{b/A}	55,1 ^{b/B}	567 ^{b/A}	18,5 ^{a/A}	34,0 ^{a/A}
Mittelwert	0	34,5	33,6	422	21,2	38,7
	gesamt	38,1	42,1	470	21,1	37,5

Im Jahr 2006 entwickelte sich aus 400 keimfähigen ausgesäten Körnern m⁻² eine **Bestandesdichte** von 470 Ähren tragenden Halmen m⁻² im Mittel über die verglichenen Varianten. Die Bestandesdichte konnte durch Anwendung der Gärprodukte bzw. des Mineraldüngers um 40 bis 170 Ähren m⁻² erhöht werden. Diese Steigerung war jedoch nur für den mineralisch gedüngten Bestand signifikant. Zwischen den vier gedüngten Varianten gab es zwar keine signifikanten Unterschiede, jedoch war die Anzahl der Ähren je m² des mit GP A gedüngten Bestandes tendenziell höher als die der mit GP B und C gedüngten Bestände.

Die aus den zwei vorangegangenen Parametern und der Tausendkornmasse berechnete **Anzahl der Körner je Ähre** nahm nur durch Düngung mit den GP B und C gegenüber den Kontrollvarianten leicht zu, die Unterschiede waren jedoch nicht signifikant. Zwischen den Düngevarianten waren ebenfalls keine Unterschiede nachweisbar. Die etwas geringere Anzahl der Ähren tragenden Halme je m² bei den Varianten GP B und C wurde somit zum Teil kompensiert. Bei den mit GP A und den mineralisch gedüngten Parzellen musste mit den vorhandenen Nährelementen bereits eine höhere Anzahl an Ähren tragenden Halmen versorgt werden, so dass der Ertrag auch ohne eine gesteigerte Kornanzahl je Ähre hoch war bzw. für eine weitere Ertragssteigerung über den Parameter Kornanzahl je Ähre Stickstoff nicht mehr ausreichend zur Verfügung stand.

Bei den Ergebnissen zur **Tausendkornmasse** (TKM) ist der Kompensationseffekt nur noch bei der Kontrolle erkennbar, bei der in diesem Jahr durchgehend tendenziell höhere Werte gemessen wurden als bei den gedüngten Beständen. Der Unterschied war dabei nur gegenüber der mineralisch gedüngten Variante signifikant. Von den gedüngten Beständen wies die MD-

Variante mit nur 34 g die geringste TKM auf, der Unterschied zu den mit Gärprodukt gedüngten Varianten war jedoch nicht signifikant.

Die TKM hängt eng zusammen mit der Größe der Körner, wie die Ergebnisse der **Siebsortierung** zeigen (Abbildung 4-11).

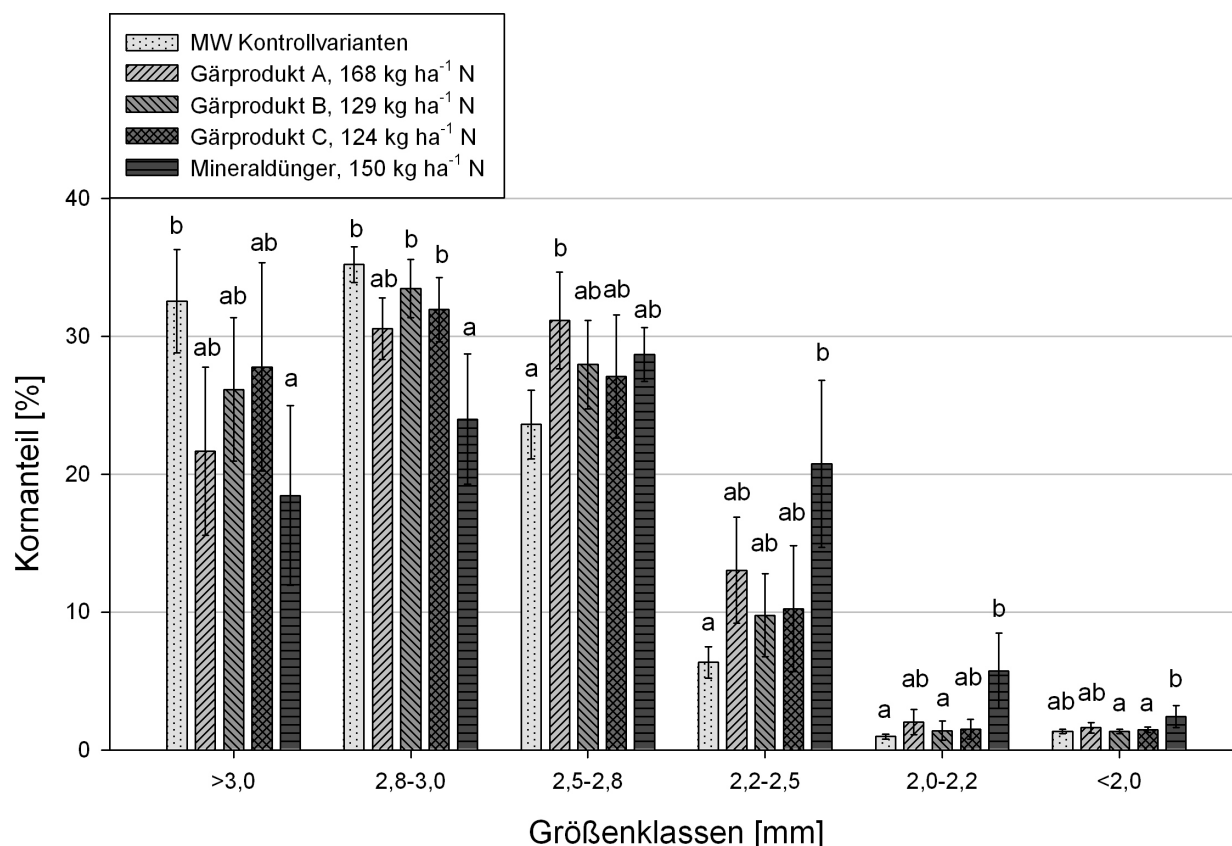


Abbildung 4-11: Ergebnisse der Siebsortierung des Sommerweizenkorns im Jahr 2006 in Abhängigkeit von der Düngung im Vergleich zur Kontrolle

Mittelwerte \pm Standardabweichungen; innerhalb einer Fraktion unterscheiden sich Mittelwerte mit gleichen Buchstaben nicht signifikant voneinander; Auswertung mittels Rangverfahren 5 %; $n = 4$

Durch die Düngung nahm in allen Varianten der Anteil der großen Körner in den Fraktionen $> 2,8$ mm gegenüber den Kontrollvarianten ab und der Anteil an Körnern der Größe 2,0 bis 2,8 mm zu. Der Anteil der sehr kleinen Körner (< 2 mm) war demgegenüber bei allen Varianten sehr gering. Die Korngröße hat also durch die Düngung abgenommen und steht somit, wie auch die TKM, im inversen Zusammenhang mit dem Ertrag. Wie bereits bei anderen Parametern lagen die Siebsortierungs-Werte der Variante GP A denen der MD-Variante näher als die Werte der anderen beiden Gärprodukt-Varianten. Bei den gut mit Nährstoffen versorgten Beständen etablierten sich in der frühen Entwicklungsphase höhere Bestandesdichten. Für eine gute Ausbildung der Körner je Ähre sowie ein hohes Wachstum des einzelnen Korns fehlten am Ende der Vegetationsperiode Nährstoffe. Dies wird in der landwirtschaftlichen Praxis durch eine zweite und gegebenenfalls dritte Stickstoffgabe verhindert.

Die Mahlfähigkeit des Sommerweizenkorns wurde nicht untersucht. Es gibt jedoch indirekte Qualitätskriterien, die Rückschlüsse auf die Backqualität zulassen. Hierzu gehört der Proteingehalt des Korns, da dieser mit dem Klebergehalt korreliert (KÜBLER, 1994). Er wird hauptsächlich durch die Gesamtstickstoffversorgung beeinflusst. Der **Rohproteingehalt** des Sommerweizenkorns wurde durch Multiplikation des N-Gehalts mit dem Faktor 5,7 ermittelt und ist in Abbildung 4-12 dargestellt.

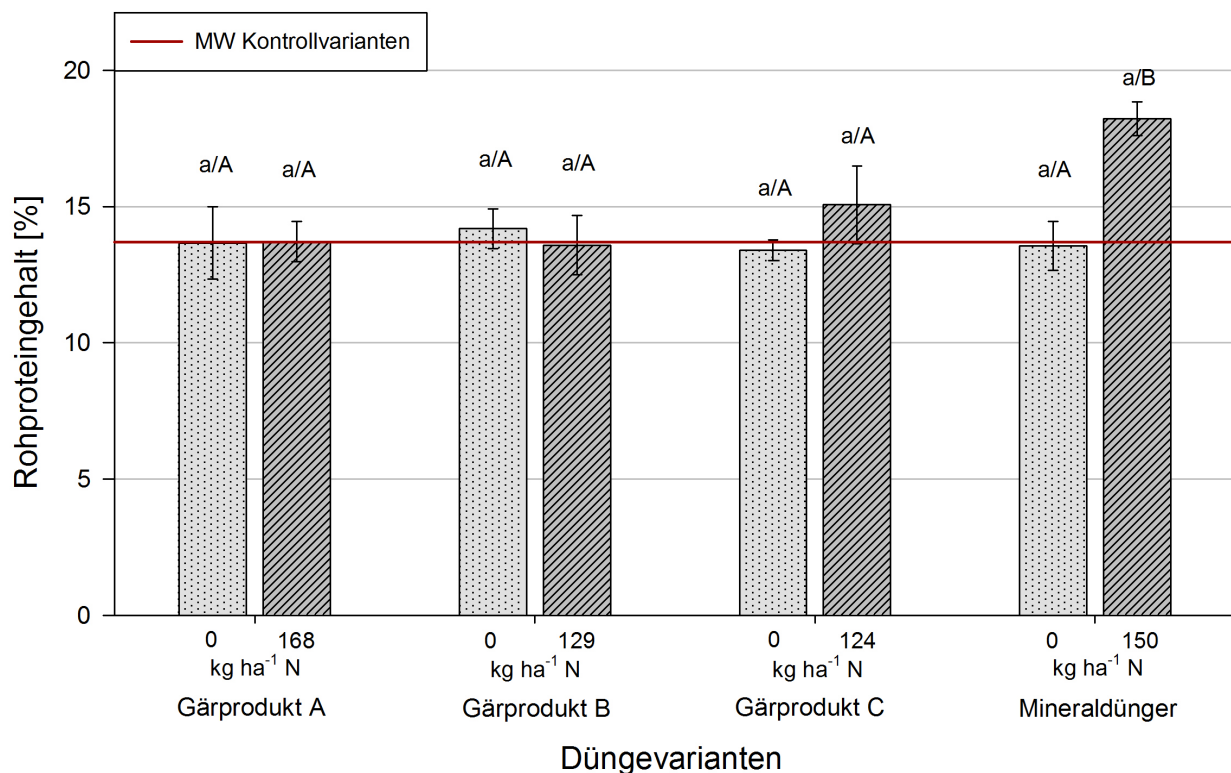


Abbildung 4-12: Rohproteingehalt des Sommerweizenkorns im Jahr 2006 in Abhängigkeit von der Düngung

Mittelwerte \pm Standardabweichungen; innerhalb einer Düngerart unterscheiden sich Mittelwerte mit gleichen kleinen Buchstaben bzw. innerhalb einer Aufwandmenge unterscheiden sich Mittelwerte mit gleichen großen Buchstaben nicht signifikant voneinander, Tukey-Test mit $\alpha = 0,05$; $n = 4$

Im Mittel der verglichenen Varianten lag der Rohproteingehalt des Sommerweizenkorns bei 13,2 %. Bei den drei Gärproduktvarianten unterschieden sich die Gehalte der gedüngten Pflanzen mit 12,4 (GP B) bis 13,7 % (GP C) nicht signifikant von den Kontrollvarianten. Die MD-Variante wies mit 16,6 % einen signifikant höheren Rohproteingehalt auf als die zugehörige Kontrollvariante. Ein signifikanter Unterschied bestand ebenfalls zwischen den Rohproteingehalten der mit Gärprodukten gedüngten Varianten und der MD-Variante. Vergleicht man die Ergebnisse mit den TKM, so zeigt sich eine negative Korrelation: Mit sinkender TKM steigt der Rohproteingehalt.

Als Zwischenfrucht im Herbst wurde **Ölrettich** ohne zusätzliche Düngung angebaut und am 18. Oktober ebenfalls geerntet. Anhand der **Erträge** ist zu erkennen, dass nach der Sommer-

weizenernte insbesondere in den gedüngten Parzellen noch ein relativ hoher Stickstoffvorrat im Boden vorhanden gewesen sein muss (Abbildung 4-13).

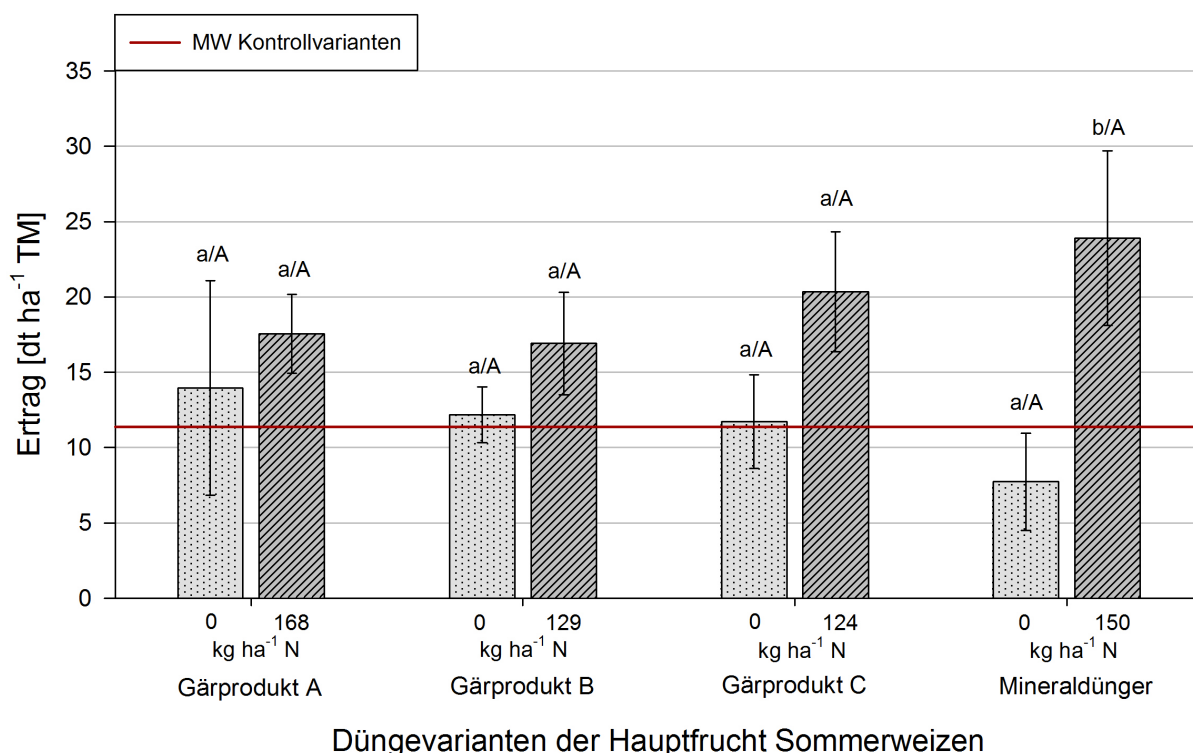


Abbildung 4-13: Ganzpflanzenertrag der Zwischenfrucht Ölrettich (TM) im Jahr 2006 in Abhängigkeit von der Düngung der Vorfrucht im Vergleich zur Kontrolle

Mittelwerte \pm Standardabweichungen; innerhalb eines Düngers unterscheiden sich Mittelwerte mit gleichen kleinen Buchstaben bzw. innerhalb einer Aufwandmenge unterscheiden sich Mittelwerte mit gleichen großen Buchstaben nicht signifikant voneinander, Tukey-Test mit $\alpha = 0,05$; $n = 4$

Dieser führte in allen Düngevarianten zu einem erhöhten Ölrettichertrag gegenüber den ungedüngten Kontrollvarianten, in der MD-Variante war dieser Unterschied sogar signifikant. Direkt nach der Weizenernte betrug der N_{\min} -Vorrat im Mittel über die Parzellen 42 kg ha^{-1} . Dies ist für eine Herbstuntersuchung auf diesem Standort ein relativ hoher Wert (Tabelle 7-4 im Anhang).

Die **Stickstoffentzüge** wurden aus den Weizenkorn-, Weizenstroh- und Ölretticherträgen (Ganzpflanze) sowie den N-Gehalten der Ernteprodukte berechnet und zeigen somit an, wie viel Stickstoff dem Boden durch die oberirdische Pflanzenmasse in einem Jahr entzogen wurde. Die ungedüngten Pflanzen der Kontrollvarianten nahmen Stickstoff ausschließlich aus dem Bodenvorrat auf. Im Jahr 2006 betrug diese Stickstoffmenge $95 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ (Abbildung 4-14).

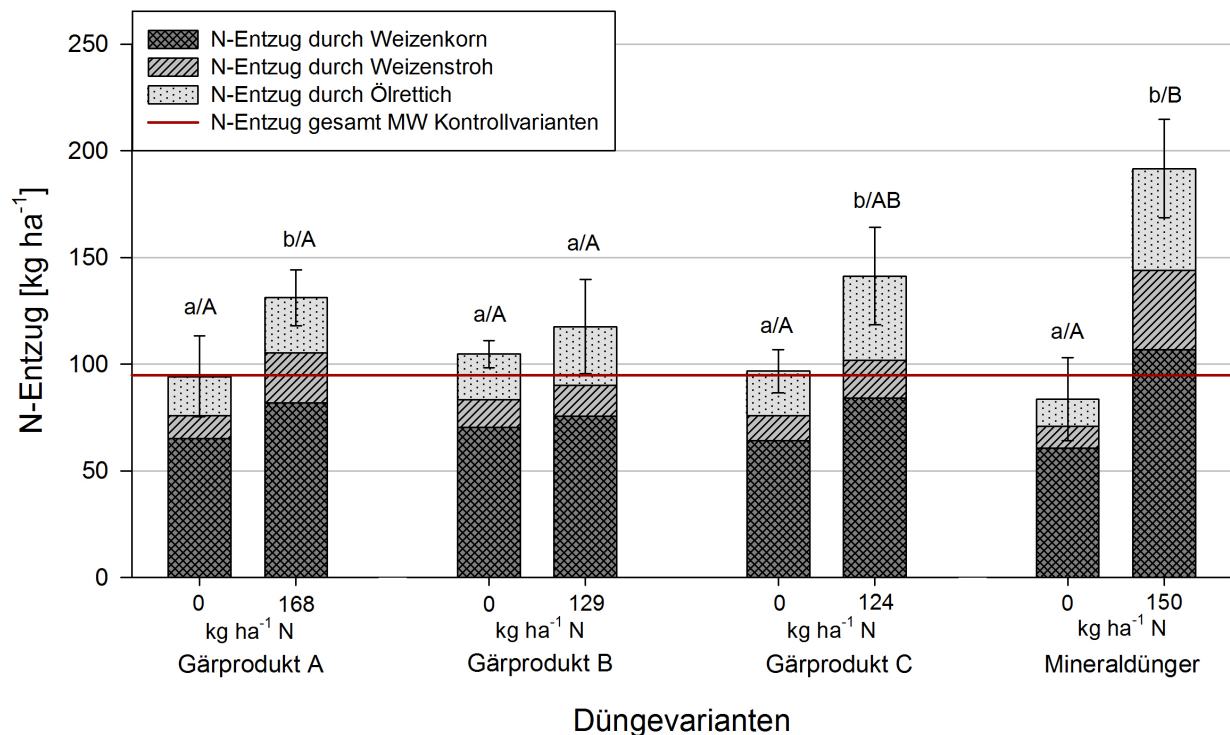


Abbildung 4-14: Stickstoffentzüge durch Sommerweizen (Korn und Stroh) sowie die Zwischenfrucht Ölrettich (Ganzpflanze) im Jahr 2006 in Abhängigkeit von der Düngung im Vergleich zur Kontrolle

Mittelwerte \pm Standardabweichungen; innerhalb einer Düngerart unterscheiden sich Mittelwerte mit gleichen kleinen Buchstaben bzw. innerhalb einer Aufwandmenge unterscheiden sich Mittelwerte mit gleichen großen Buchstaben nicht signifikant voneinander, Tukey-Test mit $\alpha = 0,05$; $n = 4$

Außer beim GP B war der N-Entzug in den gedüngten Varianten signifikant höher als in den jeweils zugehörigen Kontrollvarianten. Die mineralisch gedüngte Variante wandelte mit 194 kg ha^{-1} mehr Stickstoff in Pflanzenmasse um, als durch Kalkammonsalpeter zugeführt wurde. Die gedüngte N-Menge von 150 kg ha^{-1} entsprach etwa der durch Weizenkorn und -stroh entzogenen Menge. Die darüber hinausgehende N-Menge wurde durch die Zwischenfrucht Ölrettich entzogen. Mit 117 bis $141 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ entsprach der N-Entzug durch die mit Gärprodukten gedüngten Weizen- und Ölrettichbestände etwa der zugeführten N-Menge. Die nur durch Weizen entzogene N-Menge lag somit unter der zugeführten Menge. Im Verhältnis zur gesamten durch Weizen aufgenommenen N-Menge war der Anteil des in Strohmasse umgesetzten Stickstoffs bei den Düngern GP A und MD etwas größer als bei den GP B und C, da sowohl der N-Gehalt des Strohs als auch das Strohertrag:Kornertrag-Verhältnis höher waren. Dies deutet darauf hin, dass den mit GP A und MD gedüngten Beständen insbesondere zu Beginn der Vegetationsperiode mehr Stickstoff zur Verfügung stand als den mit GP B und C gedüngten Pflanzen. Die ausführlichen **Nährstoffbilanzen für die Nährelemente N, P und K** für Sommerweizen und Ölrettich sind im Anhang in der Tabelle 7-7 dargestellt. Neben $95 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ wurde dem Boden der Kontrollvariante durch Sommerweizen und Ölrettich auch $17 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}$ sowie $85 \text{ kg ha}^{-1} \text{ K}$ entzogen. Nach der Sommerweizenernte waren die Bilanzen der mit ca. $150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ aus Gärprodukten gedüngten Parzellen für die Nährelemente N und P noch

soweit positiv, dass bei allen Varianten für die erzielten Erträge eine Aufwandmenge von etwa $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ ausgereicht hätte. Für die Mineraldüngervariante war dies nicht der Fall, da die $150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ durch den höheren Ertrag annähernd ausgeschöpft wurden. Die K-Bilanz der Gärprodukt-Varianten war nach der Weizenernte nur für das GP B positiv. Dieses wies im Jahr 2006 einen höheren K_{DL} - als N-Gehalt auf. Bei den GP A und C war der N-Gehalt demgegenüber höher. Nach der Ölrettichernte waren die P-Bilanzen der Gärprodukt-Varianten nahezu ausgeglichen. Die N-Bilanzen waren auf den mit GP C und MD gedüngten Parzellen nach der Ernte der Zwischenfrucht leicht negativ.

Versuchsjahr 2007

Die **Korn- und Stroherträge** des Sommerweizens lagen im Jahr 2007 mit Werten zwischen 14 und 26 bzw. 13 und 29 dt ha^{-1} deutlich unter dem Vorjahresniveau (Tabelle 4-5).

Tabelle 4-5: Kornertrag (86 % TS), Strohertrag (TM) sowie Ertragsstruktur (Bestandesdichte, Körner je Ähre und Tausendkornmasse (TKM)) von Sommerweizen im Jahr 2007 in Abhängigkeit von der Düngerart und der N-Aufwandmenge im Vergleich zur Kontrolle

Innerhalb einer Düngerart unterscheiden sich Mittelwerte mit gleichen kleinen Buchstaben bzw. innerhalb einer Aufwandmenge unterscheiden sich Mittelwerte mit gleichen großen Buchstaben nicht signifikant voneinander, Tukey-Test mit $\alpha = 0,05$; $n = 4$

Dünger	N-Aufwand- menge [$\text{kg ha}^{-1} \text{ N}$]	Kornertrag (86 % TS) [dt ha^{-1}]	Strohertrag (TM) [dt ha^{-1}]	Bestandes- dichte [Ähren m^{-2}]	Körner je Ähre [Körner Ähre $^{-1}$]	Tausend- kornmasse [g]
GP A	0	14,4 ^{a/A}	12,8 ^{a/A}	358 ^{a/A}	12,1 ^{a/A}	33,5 ^{a/A}
	50	16,5 ^{ab/A}	14,0 ^{a/A}	385 ^{a/A}	12,5 ^{a/A}	34,3 ^{a/A}
	100	19,6 ^{b/AB}	20,2 ^{b/AB}	426 ^{a/A}	13,4 ^{a/A}	34,5 ^{a/A}
	150	21,3 ^{b/A}	20,0 ^{b/A}	434 ^{a/A}	14,1 ^{a/A}	34,8 ^{a/B}
GP B	0	15,3 ^{a/A}	13,7 ^{a/A}	354 ^{a/A}	13,1 ^{a/A}	32,9 ^{a/A}
	50	16,0 ^{ab/A}	16,1 ^{ab/AB}	383 ^{a/A}	12,4 ^{a/A}	33,7 ^{a/A}
	100	18,8 ^{ab/A}	17,4 ^{ab/A}	404 ^{a/A}	13,6 ^{a/A}	34,1 ^{a/A}
	150	20,9 ^{b/A}	19,5 ^{b/A}	422 ^{a/A}	14,2 ^{a/A}	34,9 ^{a/B}
GP C	0	15,3 ^{a/A}	13,1 ^{a/A}	385 ^{ab/A}	12,0 ^{a/A}	33,3 ^{a/A}
	50	16,7 ^{a/A}	13,7 ^{ab/A}	366 ^{a/A}	13,5 ^{a/A}	33,9 ^{a/A}
	100	19,5 ^{ab/AB}	17,8 ^{bc/A}	404 ^{ab/A}	14,0 ^{a/A}	34,6 ^{a/A}
	150	22,2 ^{b/A}	19,8 ^{c/A}	459 ^{b/AB}	14,1 ^{a/A}	34,2 ^{a/AB}
MD	0	15,1 ^{a/A}	12,9 ^{a/A}	331 ^{a/A}	13,6 ^{a/A}	33,5 ^{a/A}
	50	17,3 ^{a/A}	20,3 ^{b/B}	364 ^{a/A}	14,3 ^{a/A}	33,1 ^{a/A}
	100	24,4 ^{b/B}	25,1 ^{bc/B}	488 ^{b/A}	14,8 ^{a/A}	33,7 ^{a/A}
	150	25,7 ^{b/A}	29,3 ^{c/B}	523 ^{b/B}	15,2 ^{a/A}	32,3 ^{a/A}
Mittel- wert	0	15,0	13,1	357	12,7	33,3
	gesamt	18,7	17,9	405	13,6	33,8

Bei allen Düngern erbrachte eine höhere N-Aufwandmenge auch einen höheren Korn- bzw. Strohertrag und in allen Fällen waren sowohl die Korn- als auch die Stroherträge der $150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ -Varianten signifikant höher als die der jeweiligen Kontrollvarianten. Die höchsten

Erträge erreichte die Mineraldüngervariante mit 26 dt ha⁻¹ Korn und 29 dt ha⁻¹ Stroh. Das entspricht einer Steigerung von 71 bzw. 124 % gegenüber der Kontrollvariante. Die Kornenerträge der drei mit 150 kg ha⁻¹ N aus Gärprodukten gedüngten Varianten unterschieden sich nicht signifikant von der Mineraldüngervariante und erzielten mit Werten zwischen 21 und 22 dt ha⁻¹ Ertragssteigerungen von 39 bis 48 % gegenüber den jeweiligen Kontrollvarianten. Die Stroherträge waren demgegenüber mit Werten von etwa 20 dt ha⁻¹ signifikant geringer als die der Mineraldüngervariante. Die Ertragssteigerungen gegenüber den Kontrollvarianten betrugen zwischen 49 und 53 %. Die drei Gärprodukte unterschieden sich in ihrer Ertragswirkung auf Sommerweizen in diesem Jahr nicht. Die MD-Variante wies im Vergleich zu den Gärprodukt-Varianten ein etwas höheres Strohertrag:Korntrag-Verhältnis auf.

Zur Ermittlung der **N-Düngewirkung** der organischen Dünger im Vergleich zu Mineralstickstoffdünger wurden für das Jahr 2007 verschiedene Methoden gegenübergestellt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4-6 zusammengefasst.

Tabelle 4-6: N-Düngewirkung der Gärprodukte (100 kg ha⁻¹ N) im Vergleich zu N-Mineraldünger beim Sommerweizen im Jahr 2007 nach verschiedenen Methoden berechnet

Dünger	Methode 1 [Ertrag in % der MD-Variante]	Methode 2 [Ertrag in % der MD-Variante nach Abzug des Ertrags der Kontrolle]	Methode 3 [kg N aus MD, die den gleichen Ertrag erreichen wie 100 kg N aus dem GP]	Methode 4 [kg N aus MD, die den gleichen N-Entzug erreichen wie 100 kg N aus dem GP]
GP A	81	59	55	48
GP B	73	33	37	37
GP C	75	42	42	48

Bei der Methode 1 wurde der TM-Ertrag der mit 100 kg ha⁻¹ N gedüngten Mineraldüngervariante auf 100 % gesetzt und berechnet, wie viel Prozent entsprechend die Gärprodukt-Varianten erreichten. Bei dieser Methode werden der Ertrag der Kontrolle und damit die Grundversorgung des Bodens mit Nährstoffen nicht beachtet. Die durch die Düngung erzielten Unterschiede fallen dadurch weniger stark ins Gewicht. Die berechneten Werte für die drei Gärprodukte lagen zwischen 73 und 81 % und unterschieden sich damit nur gering.

Bei der 2. Methode wurden die Mehrerträge gegenüber der Kontrolle der mit 100 kg ha⁻¹ N gedüngten Varianten entsprechend der Methode 1 zueinander ins Verhältnis gesetzt. Somit wird bei gleicher Aufwandmenge die reine Düngewirkung verglichen. Nach dieser Methode lagen die N-Düngewirkungen der drei Gärprodukte zwischen 33 und 59 %. Die Unterschiede zwischen den Gärprodukten sind nach dieser Methode größer als im ersten Ansatz. GP A erreichte die höchste, GP B die geringste N-Düngewirkung.

Bei der Methode 3 wurde berechnet, mit welcher N-Aufwandmenge durch mineralische Düngung der gleiche TM-Ertrag erzielt wurde wie durch eine Düngung mit 100 kg ha⁻¹ N aus den Gärprodukten. Die Berechnungen ergaben, dass zwischen 37 und 55 kg Mineraldünger durch

eine Düngung mit $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ aus den Gärprodukten eingespart werden können. Die Ergebnisse dieser Methode waren somit vergleichbar mit denen der Methode 2.

Die Berechnungen der 4. Methode waren identisch mit denen der Methode 3, jedoch war die Bezugsbasis der N-Entzug und nicht der TM-Ertrag. Die nach dieser Methode berechneten Werte lagen auf einem ähnlichen Niveau wie die nach den Methoden 2 und 3 berechneten Werte, jedoch waren die Unterschiede zwischen den drei Gärprodukten mit Werten zwischen 37 und 48 geringer. Durch Düngung mit den GP A und C wurde der ausgebrachte Stickstoff gleich gut ausgenutzt. In den GP A-Varianten wurde jedoch im Verhältnis mehr Stickstoff in Ertrag umgesetzt, während in den GP C-Varianten der Stickstoff in einen höheren N-Gehalt der Ernteprodukte umgesetzt wurde.

Bei allen Methoden erwies sich die N-Düngewirkung des GP B im Vergleich zum Mineraldünger als die geringste. Die Wirkungen der GP A und C waren je nach verwendeter Berechnungsmethode relativ ähnlich mit etwas höheren Werten beim GP A. Trotz der wahrscheinlich aufgetretenen N-Nachlieferung aus den organischen Düngern vom Vorjahr lagen die wirksam werden den N-Anteile der Gärprodukte in der Regel je nach Gärprodukt und verwendeter Berechnungsmethode unter 50 %, zum Teil aber auch noch deutlich darunter.

Die **Bestandesdichte** des Sommerweizens war mit einem Mittelwert von 405 Ähren je m^2 in diesem Jahr sehr gering, was auf die extreme Trockenheit im April zurückzuführen ist. Sie nahm, wie auch der Ertrag, mit einer Ausnahme bei allen Düngern mit steigender N-Aufwandmenge zu, wobei der Unterschied zur zugehörigen Kontrolle nur für die MD-Variante signifikant war (Tabelle 4-5). Die höchsten Werte erreichte die mit $150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ mineralisch gedüngte Variante mit 523 Ähren je m^2 . Die Gärproduktvarianten der gleichen N-Aufwandmenge lagen mit 422 bis 459 Ähren je m^2 deutlich darunter, bei GP A und B war dieser Unterschied signifikant.

Wie auch die Erträge und die Bestandesdichte, war die **Anzahl der Körner je Ähre** mit einem Gesamtmittelwert von 14 auf einem deutlich geringeren Niveau als im Vorjahr. Sie nahm ebenfalls mit steigender N-Aufwandmenge für alle Düngerarten zu, wobei die Unterschiede zwischen den verschiedenen Aufwandmengen bei keinem der Dünger signifikant waren.

Die **Tausendkornmasse** war im Mittel über alle Varianten mit 34 g ebenfalls geringer als im Vorjahr. Bei den Düngern GP A und B führte eine Steigerung der N-Düngung zu einer etwas höheren TKM. Die geringe Bestandesdichte und Kornzahl je Ähre wurden dadurch zum Teil kompensiert. Die Unterschiede waren jedoch nicht signifikant. Bei den Düngern GP C und MD war die TKM der mit $150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ gedüngten Bestände jeweils geringer als die mit nur $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ gedüngten. Die gegenüber den beiden anderen Düngern höheren Bestandesdichten der $150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ -Varianten wurden somit durch geringere TKM wieder ausgeglichen.

Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der **Siebsortierung** der verschiedenen gedüngten Sommerweizenvarianten waren im Jahr 2007 geringer als im Vorjahr (Abbildung 4-15).

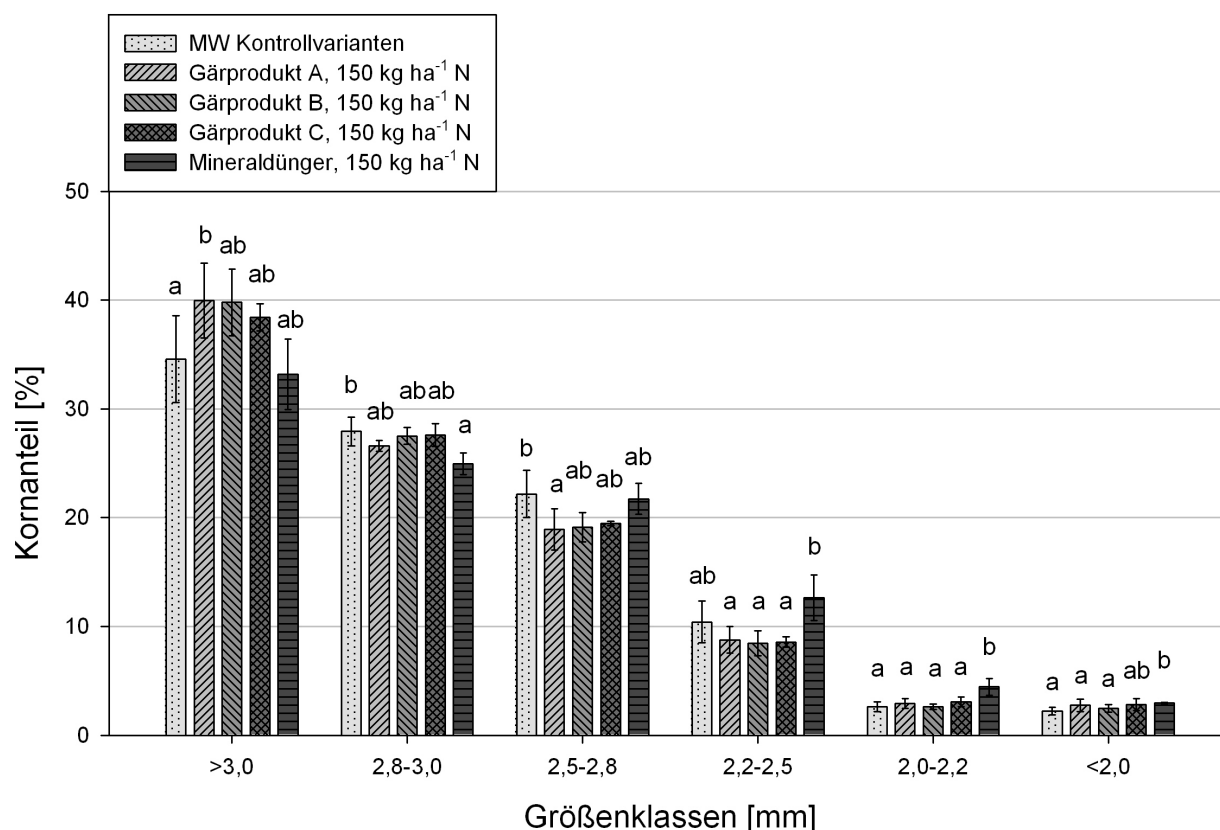


Abbildung 4-15: Ergebnisse der Siebsortierung des Sommerweizenkorns im Jahr 2007 in Abhängigkeit von der Düngung im Vergleich zur Kontrolle

Mittelwerte \pm Standardabweichungen; innerhalb einer Fraktion unterscheiden sich Mittelwerte mit gleichen Buchstaben nicht signifikant voneinander; Tukey-Test mit $\alpha = 0,05$ / Auswertung mittels Rangverfahren 5 %: Fraktionen 2,2-2,5 mm und $< 2,0$ mm; $n = 4$

Dabei war der Anteil der > 3 mm großen Körner in allen Varianten mit 33 bis 40 % relativ groß, der mittlere Anteil, insbesondere der 2,5-2,8 mm großen Körner, jedoch deutlich geringer als im Vorjahr. Vergleicht man die Korndurchmesser der MD-Variante mit denen der Gärprodukt-Varianten, ist die Verteilung gegensätzlich: Die MD-Variante wies bei den Fraktionen großer Korndurchmesser geringere Anteile auf als die Kontrollvariante, bei den Fraktionen kleiner Korngrößen waren die Anteile höher. Die Gärprodukt-Varianten wiesen demgegenüber höhere Anteile an großen Körnern und geringere Anteile an kleinen Körnern als die Kontrollvarianten auf. Da die Wasserversorgung im Sommer 2007 kein begrenzender Faktor gewesen sein dürfte, ist diese Verteilung ein Hinweis darauf, dass der Stickstoff insbesondere in der mineralisch gedüngten Variante zur Ausbildung größerer Körner nicht mehr ausreichte, da bereits eine hohe Bestandesdichte sowie eine hohe Anzahl an Körnern je Ähre angelegt wurden.

Der **Rohproteingehalt** des Sommerweizens im Jahr 2007 erreichte im Mittel über alle Parzellen einen Wert von 13,5 %, also ein ähnliches Niveau wie im Vorjahr. Bei den drei Gärprodukt-Varianten unterschieden sich die Rohproteingehalte der mit den verschiedenen N-Aufwandmengen gedüngten Weizenpflanzen weder von den Gehalten der zugehörigen Kontrollvarianten noch untereinander (Abbildung 4-16).

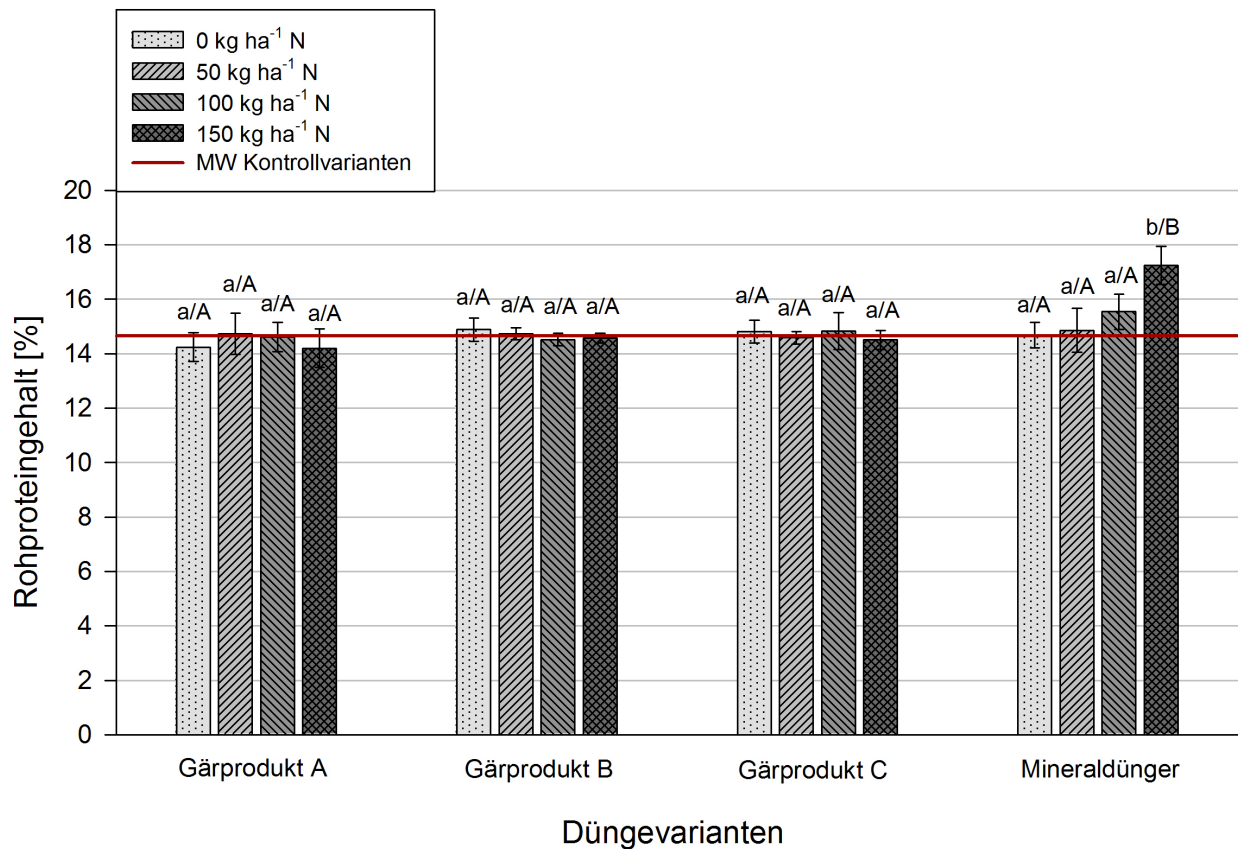


Abbildung 4-16: Rohproteingehalt des Sommerweizens im Jahr 2007 in Abhängigkeit von der Düngerart und der Aufwandmenge

Mittelwerte \pm Standardabweichungen; innerhalb einer Düngerart unterscheiden sich Mittelwerte mit gleichen kleinen Buchstaben bzw. innerhalb einer Aufwandmenge unterscheiden sich Mittelwerte mit gleichen großen Buchstaben nicht signifikant voneinander, Tukey-Test mit $\alpha = 0,05$; $n = 4$

Bei der MD-Variante bewirkte die Düngung mit $150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ mit 15,7 % einen signifikant höheren Rohproteingehalt als bei der Kontrolle mit 13,4 % sowie bei den 50 und $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ -Varianten mit 13,6 und 14,2 %. Dieser Gehalt unterschied sich ebenfalls signifikant von den drei mit $150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ aus Gärprodukten gedüngten Varianten.

Die **Stickstoffentzüge** der oberirdischen Biomasse des Sommerweizens im Jahr 2007 lagen deutlich unter der jeweils durch Düngung zugeführten Stickstoffmenge (Abbildung 4-17).

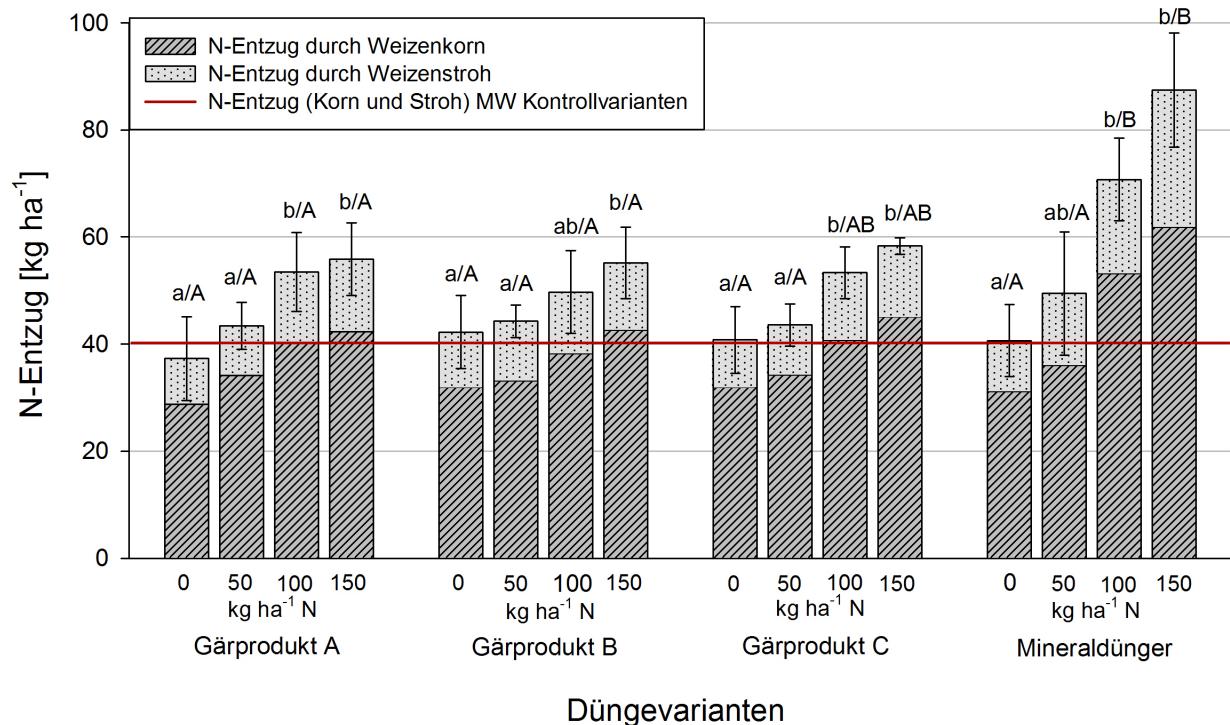


Abbildung 4-17: Stickstoffentzüge des Sommerweizens (Korn und Stroh) im Jahr 2007 in Abhängigkeit von der Düngerart und der N-Aufwandmenge im Vergleich zur Kontrolle

Mittelwerte \pm Standardabweichungen; innerhalb einer Düngerart unterscheiden sich Mittelwerte mit gleichen kleinen Buchstaben bzw. innerhalb einer Aufwandmenge unterscheiden sich Mittelwerte mit gleichen großen Buchstaben nicht signifikant voneinander, Auswertung mittels Rangverfahren mit 5 %; $n = 4$

Der N-Entzug durch Sommerweizen betrug insgesamt zwischen 37 und 87 kg ha⁻¹, wobei durch die Kontrollvarianten gemittelt über die vier Düngevarianten 40 kg ha⁻¹ N entzogen wurden. Bei allen Düngerarten war der N-Entzug der mit 150 kg ha⁻¹ N gedüngten Variante signifikant höher als bei der jeweils zugehörigen Kontrolle. Die mit 150 kg ha⁻¹ N gedüngten Pflanzen der MD-Variante entzogen dem Boden signifikant mehr N als die der GP A- und B-Varianten. Unterschiede zwischen den Stickstoffanteilen, welche durch Korn und Stroh entzogen wurden, gab es in diesem Jahr bei den Gärprodukten nicht. Die MD-Variante unterschied sich jedoch von den drei Gärprodukt-Varianten durch einen im Verhältnis höheren N-Entzug durch die gebildete Strohmasse.

Die **Bilanzen der Nährelemente N, P und K** für den Sommerweizenversuch 2007 sind im Anhang in der Tabelle 7-8 aufgeführt. Aufgrund der äußerst geringen Sommerweizenerträge in diesem Jahr waren die N-, P- und K-Bilanzen aller gedüngten Varianten positiv. Bezüglich der Bilanzen hätte für alle Dünger eine Aufwandmenge von 50 kg ha⁻¹ N somit bereits ausgereicht. Dennoch wurde der Kornertrag durch eine Steigerung der Aufwandmenge bei allen Düngern noch weiter erhöht. Das könnte dafür sprechen, dass entweder ein Teil des Stickstoffs nicht verfügbar war oder dass es Ausbringungsverluste in Form von Ammoniak gab. Auffallend sind besonders hohe K-Überschüsse in den Varianten GP B und C. Zum einen war die gebildete kaliumreiche Strohmasse durch das sehr trockene Frühjahr im Verhältnis zur Kornmasse gering,

zum anderen war der K_{DL} -Gehalt der beiden Gärprodukte höher als der N-Gehalt, was für das GP A nicht zutraf.

Silomais

Im folgenden Abschnitt werden die Silomaiserträge sowie die Stickstoffentzüge durch Silomais in den Versuchsjahren 2006 und 2007 dargestellt.

Versuchsjahr 2006

Die **Silomaiserträge** waren im Jahr 2006 mit Werten zwischen 98 und 147 dt ha⁻¹ TM und einem Mittelwert über alle hier verglichenen Varianten von 119 dt ha⁻¹ standortüblich (Abbildung 4-18).

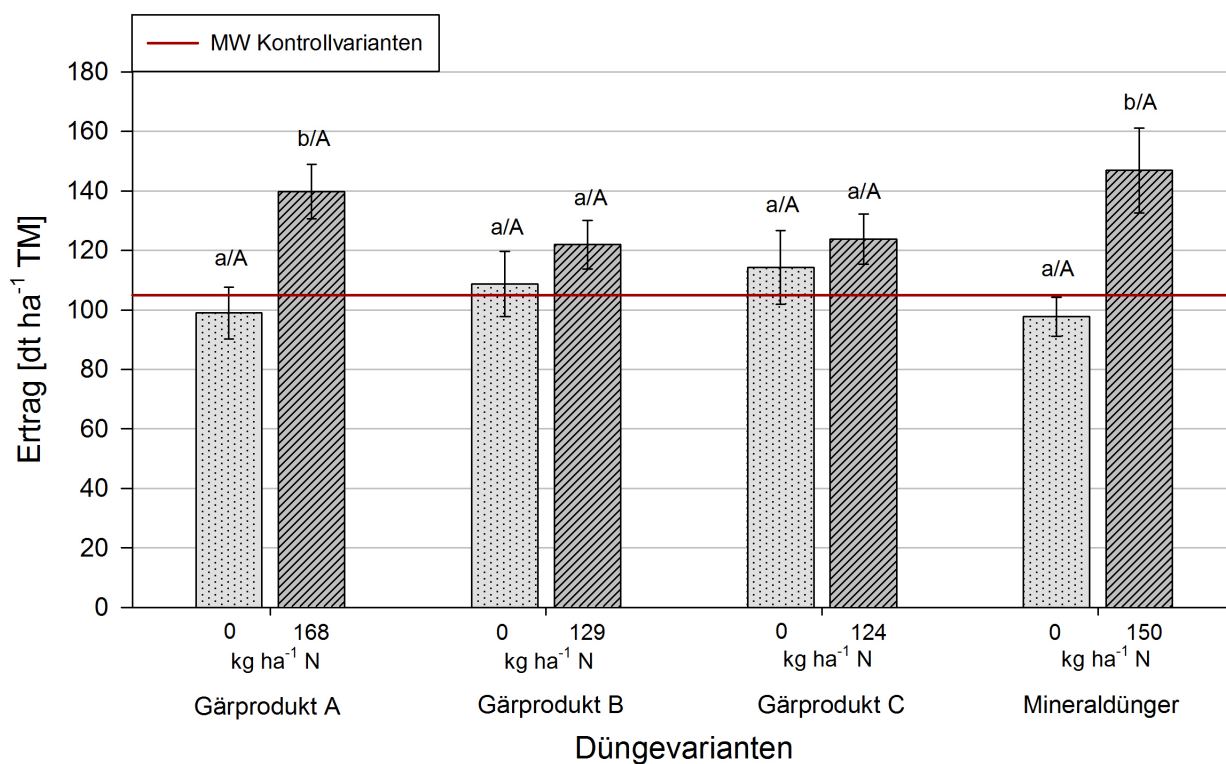


Abbildung 4-18: Silomaisertrag (TM) im Jahr 2006 in Abhängigkeit von der Düngerart im Vergleich zur Kontrolle

Mittelwerte ± Standardabweichungen; innerhalb einer Düngerart unterscheiden sich Mittelwerte mit gleichen kleinen Buchstaben bzw. innerhalb einer Aufwandmenge unterscheiden sich Mittelwerte mit gleichen großen Buchstaben nicht signifikant voneinander, Tukey-Test mit $\alpha = 0,05$; $n = 4$

Im Mittel über die Kontrollvarianten wurde ein Ertrag von 105 dt ha⁻¹ TM erreicht. Den maximalen Ertrag erzielte die mineralisch gedüngte Variante mit 147 dt ha⁻¹ TM. Das entspricht einer signifikanten Ertragssteigerung gegenüber der Kontrolle um 40 %. Auch durch das GP A wurde mit 140 dt ha⁻¹ TM eine signifikante Ertragssteigerung um 33 % gegenüber der Kontrolle erreicht. Die Erträge nach Düngung mit GP B und C unterschieden sich mit 122 (+ 16 %) und 124 dt ha⁻¹ TM (+ 18 %) nicht von denen der jeweiligen Kontrollvarianten. Die Erträge der drei

Gärprodukt-Varianten unterschieden sich weder untereinander noch von denen der Mineraldüngervariante signifikant.

Die **Stickstoffentzüge** durch die oberirdische Silomaisbiomasse lagen im Jahr 2006 zwischen 74 und 170 kg ha⁻¹ N, im Durchschnitt der Kontrollvarianten wurden 82 kg ha⁻¹ N entzogen (Abbildung 4-19).

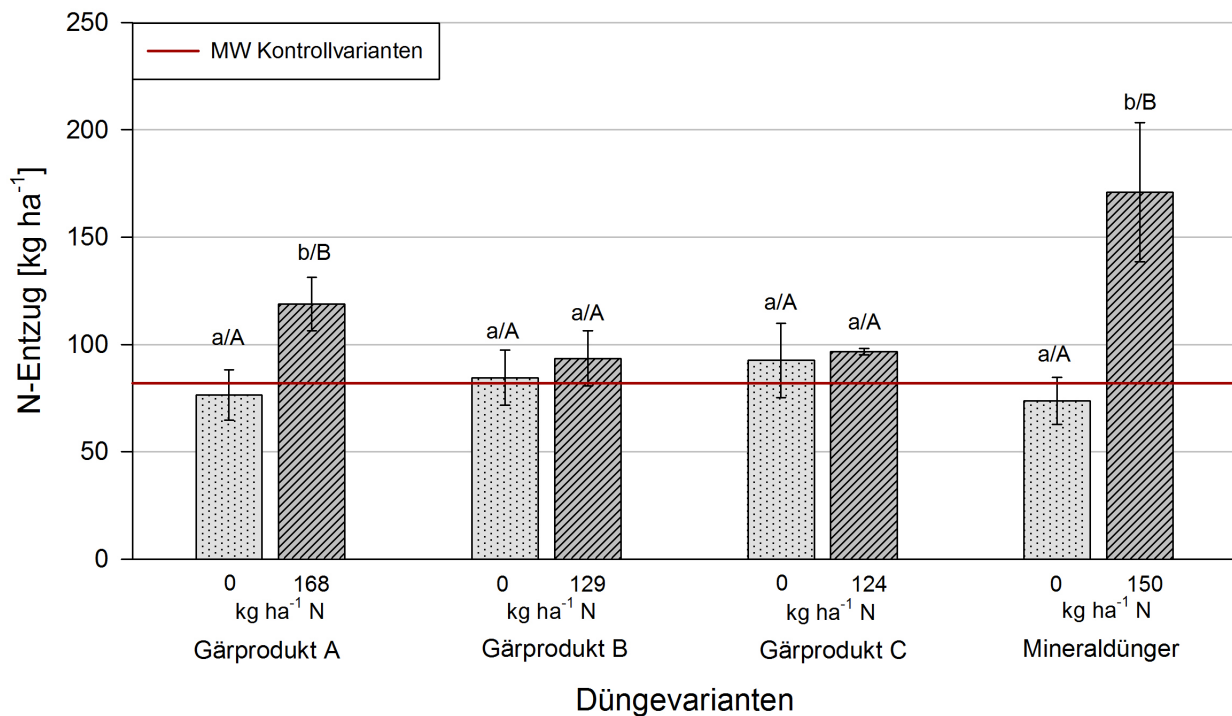


Abbildung 4-19: Stickstoffentzug durch Silomais im Jahr 2006 in Abhängigkeit von der Düngung im Vergleich zur Kontrolle

Mittelwerte ± Standardabweichungen; innerhalb einer Düngerart unterscheiden sich Mittelwerte mit gleichen kleinen Buchstaben bzw. innerhalb einer Aufwandmenge unterscheiden sich Mittelwerte mit gleichen großen Buchstaben nicht signifikant voneinander, Tukey-Test mit $\alpha = 0,05$; $n = 4$

Die N-Entzüge der hochgedüngten Gärprodukt-Varianten lagen etwas unter den durch die Dünger zugeführten N-Mengen. Bei der MD-Variante war der N-Entzug mit 170 kg ha⁻¹ etwas höher als die N-Zufuhr. Wie die Erträge, so waren auch die N-Entzüge der mit MD und GP A gedüngten Varianten signifikant höher als die der zugehörigen ungedüngten Kontrollvarianten. Bei den Varianten GP B und C lagen sie nur geringfügig über der jeweiligen Kontrollvariante.

Die **Bilanzen der Nährelemente N, P und K** sind im Anhang in der Tabelle 7-9 aufgeführt. Neben 82 kg ha⁻¹ N entzogen die ungedüngten Kontrollpflanzen dem Boden durchschnittlich 24 kg ha⁻¹ P und 113 kg ha⁻¹ K. Der hohe Kaliumbedarf der Silomaispflanzen konnte außer durch Mineraldünger in diesem Jahr nur durch das GP B gedeckt werden, dessen K_{DL}-Gehalt über dem N-Gehalt lag. Für die GP A und C waren die K-Bilanzen mit -58 und -49 kg ha⁻¹ im negativen Bereich. Die N-Bilanzen waren demgegenüber für alle drei Gärprodukte mit +28 bis +49 kg ha⁻¹ positiv. Mit Werten zwischen -4 und -8 kg ha⁻¹ waren die P-Bilanzen für die drei

Gärprodukte nahezu ausgeglichen. In der MD-Variante war durch die deutlich höhere produzierte Biomasse die N-Bilanz mit -20 kg ha^{-1} negativ. Die Kaliumbilanz war mit $+4 \text{ kg ha}^{-1}$ nahezu ausgeglichen und die Bilanz für Phosphor durch die fehlerhafte zu hohe Düngung mit einer Bilanz von $+203 \text{ kg ha}^{-1}$ im stark positiven Bereich.

Versuchsjahr 2007

Im Jahr 2007 lagen die **Trockenmasseerträge** des Silomaises zwischen 130 und 216 dt ha^{-1} (Abbildung 4-20).

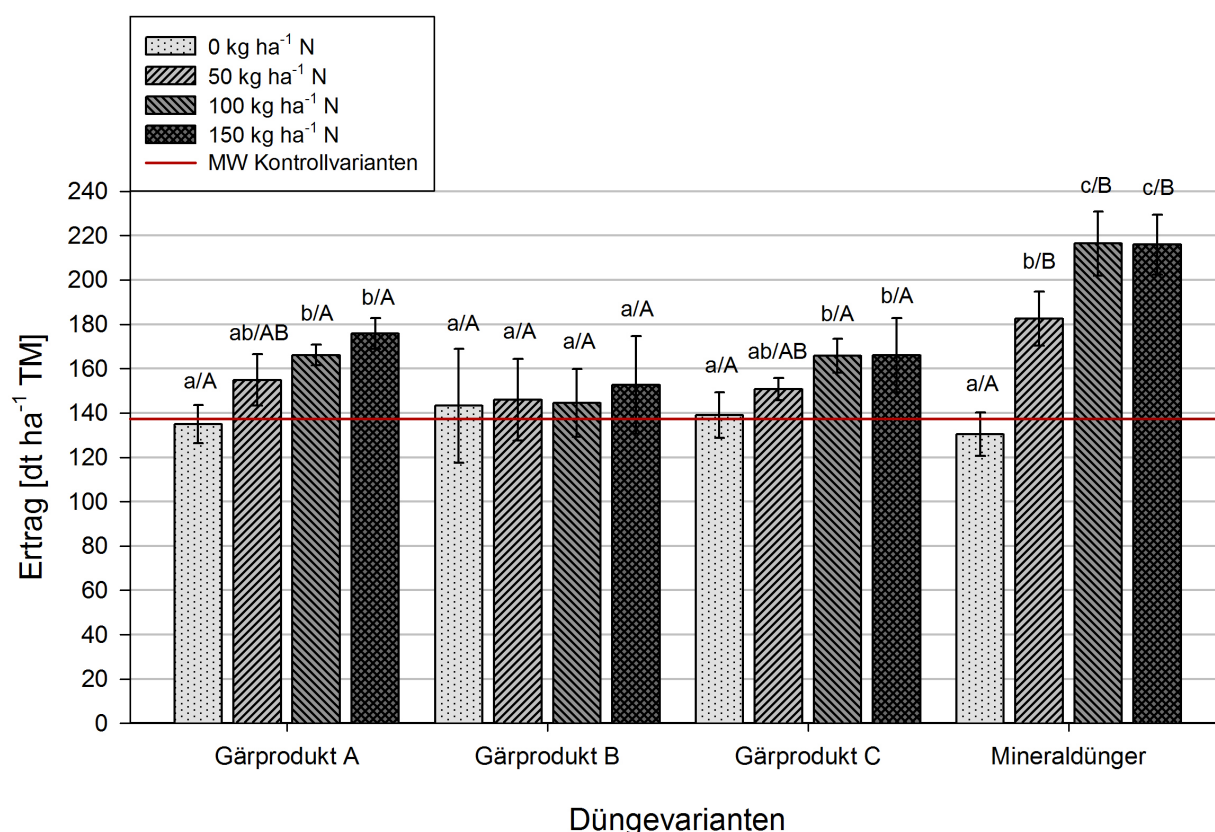


Abbildung 4-20: Silomaisertrag (TM) im Jahr 2007 in Abhängigkeit von der Düngerart und der N-Aufwandmenge

Mittelwerte \pm Standardabweichungen; innerhalb einer Düngerart unterscheiden sich Mittelwerte mit gleichen kleinen Buchstaben bzw. innerhalb einer Aufwandmenge unterscheiden sich Mittelwerte mit gleichen großen Buchstaben nicht signifikant voneinander, Tukey-Test mit $\alpha = 0,05$; $n = 4$

Dies ist bedingt durch das warme Frühjahr und den niederschlagsreichen Sommer ein relativ hohes Niveau für den Standort Berlin. Bei allen Düngern erbrachte eine höhere N-Aufwandmenge auch einen höheren Silomaisertrag, nur beim MD und dem GP C wurden durch die höchste Düngergabe gegenüber den $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ -Varianten keine Ertragssteigerungen mehr erzielt. Die höchsten Erträge von 216 dt ha^{-1} wurden in den beiden mineralisch gedüngten Varianten (100 und $150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$) gefunden. Das entspricht einer signifikanten Steigerung um 66% gegenüber der ungedüngten Kontrolle. Beim Mineraldünger erbrachte bereits eine

50 kg ha⁻¹ N-Düngung mit einem Ertrag von 183 dt ha⁻¹ eine signifikante Steigerung gegenüber der Kontrollvariante um 40 %. Durch Düngung mit GP A und C in den Aufwandmengen 100 und 150 kg ha⁻¹ N wurden jeweils signifikante Ertragssteigerungen gegenüber der Kontrollvariante erzielt. Die Düngung mit dem GP B erzielte bei keiner Aufwandmenge einen signifikanten Effekt. Beim Vergleich der vier Dünger miteinander waren die Erträge aller drei Gärproduktvarianten bei den Aufwandmengen 100 und 150 kg ha⁻¹ N signifikant geringer als die jeweilige MD-Variante. Beim GP B war dies bereits bei der Aufwandmenge 50 kg ha⁻¹ N der Fall.

Für einen Vergleich der **N-Düngewirkung** wurden, wie auch für Sommerweizen im Jahr 2007, verschiedene Methoden zur Berechnung miteinander verglichen (Tabelle 4-7).

Tabelle 4-7: N-Düngewirkung der Gärprodukte (100 kg ha⁻¹ N) im Vergleich zu N-Mineraldünger beim Silomais im Jahr 2007 nach verschiedenen Methoden berechnet

Dünger	Methode 1 [Ertrag in % der MD-Variante]	Methode 2 [Ertrag in % der MD-Variante nach Abzug des Ertrags der Kontrolle]	Methode 3 [kg N aus MD, die den gleichen Ertrag erreichen wie 100 kg N aus dem GP]	Methode 4 [kg N aus MD, die den gleichen N-Entzug erreichen wie 100 kg N aus dem GP]
GP A	77	36	30	22
GP B	67	2	11	22
GP C	77	31	30	35

Die nach Methode 1 berechneten relativen Erträge zur Mineraldüngervariante lagen für die drei Gärprodukte zwischen 67 und 77 % und damit ähnlich hoch wie beim Sommerweizen im gleichen Jahr. Das GP B erzielte, wie auch beim Sommerweizen, die geringsten relativen Erträge.

Bei der Berechnung der N-Düngewirkung nach der Methode 2 unterschieden sich die GP A und C mit Werten von 31 und 36 % nur gering voneinander. Für das GP B war eine N-Düngewirkung mit nur 2 % jedoch kaum vorhanden.

Bei der nach Methode 3 berechneten N-Düngewirkung erreichte das GP B mit 11 kg N, die bei einer Ausbringung von 100 kg ha⁻¹ N an Mineraldünger-N eingespart werden können, einen etwas höheren Wert, lag jedoch wie bei den Ergebnissen der anderen beiden Methoden deutlich unter den GP A und C. Durch den Einsatz von 100 kg ha⁻¹ N aus den GP A und C kann nach den Berechnungen nach dieser Methode Mineraldünger in der Höhe von 30 kg ha⁻¹ N ersetzt werden.

Ein anderes Bild ergaben die Berechnungen bezogen auf den N-Entzug nach der Methode 4. Für das GP A nahm die N-Düngewirkung im Vergleich zur Methode 3 ab, für die anderen beiden Gärprodukte demgegenüber zu. Die GP A und B erzielten beide einen geringen Wert von 22 kg ha⁻¹ N aus Mineraldünger, die den gleichen N-Entzug erreichen wie 100 kg ha⁻¹ N aus diesen Gärprodukten. Mit einem Wert von 35 kg ha⁻¹ N lag das GP C darüber.

Wie beim Sommerweizen erwies sich bei fast allen Methoden die N-Düngewirkung des GP B im Vergleich zur Mineraldüngervariante als die geringste. Die Wirkungen der GP A und C waren je nach verwendeter Berechnungsmethode relativ ähnlich. Die wirksam werdenden N-Anteile der

Gärprodukte lagen bei ca. 30 % bei Bezug auf den Ertrag, zum Teil aber auch niedriger. Damit ist die N-Wirkung der Gärprodukte in Mais deutlich geringer als in Weizen.

Die **Stickstoffentzüge** durch die oberirdische Silomaisbiomasse sind in Abbildung 4-21 dargestellt.

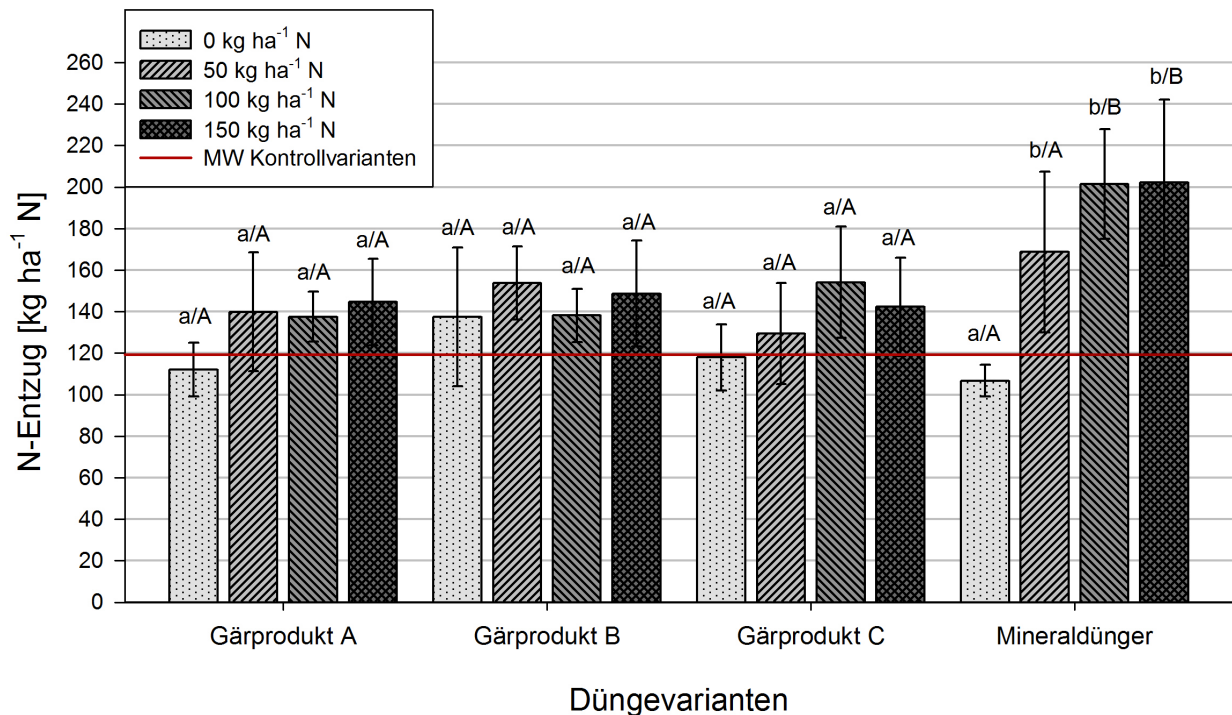


Abbildung 4-21: Stickstoffentzüge durch Silomais im Jahr 2007 in Abhängigkeit von der Düngerart und der N-Aufwandmenge im Vergleich zur Kontrolle

Mittelwerte \pm Standardabweichungen; innerhalb einer Düngerart unterscheiden sich Mittelwerte mit gleichen kleinen Buchstaben bzw. innerhalb einer Aufwandmenge unterscheiden sich Mittelwerte mit gleichen großen Buchstaben nicht signifikant voneinander, Tukey-Test mit $\alpha = 0,05$; $n = 4$

Die ungedüngten Kontrollvarianten erreichten im Mittel bereits N-Entzüge von 121 kg ha^{-1} . Bei den drei Gärprodukt-Varianten lagen die N-Entzüge der 50 , 100 und 150 kg ha^{-1} N-Varianten zwischen 130 und 155 kg ha^{-1} und unterschieden sich nicht signifikant von den jeweiligen Kontrollvarianten. Bei der MD-Variante wurde dem Boden durch alle gedüngten Varianten mit 168 bis 203 kg ha^{-1} signifikant mehr N entzogen als dem der ungedüngten Kontrollvariante. In den mit 100 und 150 kg ha^{-1} N gedüngten Parzellen war der N-Entzug bei der MD-Variante signifikant höher als bei den entsprechenden Gärprodukt-Varianten.

Die ausführlichen **Bilanzen für die Nährelemente N, P und K** sind im Anhang in der Tabelle 7-9 aufgeführt. Durch die hohen Silomaiserträge sind für fast alle Aufwandmengen die Bilanzen der drei Nährelemente negativ. Da die Erträge durch die Düngung mit Gärprodukten nicht sehr stark erhöht wurden, waren die Unterschiede in den Bilanzen durch die unterschiedliche Nährelementzufuhr relativ hoch und somit im stark negativen Bereich für die 50 kg ha^{-1} N-Varianten. Eine ausgeglichene Bilanz wurde nur für Stickstoff in den 150 kg ha^{-1} N-Varianten der drei Gär-

produkte erreicht. In der MD-Variante war die N-Bilanz durch die höheren Erträge mit -53 kg ha^{-1} negativ. Die P-Bilanzen waren in den 150 kg ha^{-1} N-Varianten mit -5 bis -14 kg ha^{-1} P ebenfalls im negativen Bereich. Für das Nährelement Kalium gab es wie im Vorjahr und beim Sommerweizen Unterschiede zwischen den Gärprodukt-Varianten. Das GP B erreicht mit -8 kg ha^{-1} K eine nahezu ausgeglichene Bilanz, die GP A und C wiesen mit -87 und -35 kg ha^{-1} K demgegenüber eine deutlich negative Bilanz auf.

4.2.3 Vergleich der N-Düngewirkungen der Gärprodukte in den beiden Versuchsjahren und für die beiden Kulturarten

Die Ertragswirkung der Gärprodukte wird für die beiden Versuchsjahre sowie für beide Kulturarten im Folgenden gegenübergestellt (Tabelle 4-8). Da für das Jahr 2006 die Berechnung der MDÄ nicht möglich war, wird dies anhand der relativen Erträge nach Abzug der Erträge der jeweiligen Kontrollvarianten (Methode 2 in der Tabelle 4-6 und der Tabelle 4-7) gemacht.

Tabelle 4-8: Vergleich der N-Düngewirkung der Gärprodukte anhand der relativen Erträge nach Abzug der Erträge der jeweiligen Kontrollvarianten bei einer N-Aufwandmenge von 150 kg ha^{-1} in den Versuchsjahren 2006 und 2007 sowie zwischen den Kulturarten Sommerweizen (Kornertrag bei 86 % TM) und Silomais (TM-Ertrag)

Kulturart	Dünger	Versuchsjahr 2006				Versuchsjahr 2007			
		Ertrag Kontrolle	Ertrag $150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$	Differenz-ertrag	Relativer Ertrag zur MD-Variante	Ertrag Kontrolle	Ertrag $150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$	Differenz-ertrag	Relativer Ertrag zur MD-Variante
		[dt ha ⁻¹]	[dt ha ⁻¹]	[dt ha ⁻¹]	[%]	[dt ha ⁻¹]	[dt ha ⁻¹]	[dt ha ⁻¹]	[%]
Sommerweizen	MD	32,4	42,7	10,3	100,0	15,1	25,7	10,6	100,0
	GP A	34,6	43,2	8,6	83,5	14,4	21,3	6,9	65,1
	GP B	36,1	40,3	4,2	40,8	15,3	20,9	5,6	52,8
	GP C	34,8	40,5	5,7	55,3	15,3	22,2	6,9	65,1
Silo-mais	MD	97,7	146,9	49,2	100,0	130,4	215,9	85,5	100,0
	GP A	99,0	139,8	40,8	82,9	135,0	175,8	40,8	47,7
	GP B	108,7	121,9	13,2	26,8	143,2	152,6	9,4	11,0
	GP C	114,3	123,8	9,5	19,3	139,1	166,1	27,0	31,6

Die Ertragswirkung war im Jahr 2006 mit einem Mittelwert über die drei Gärprodukte und beide Kulturen von 51,4 % der MD-Variante etwas höher als im Jahr 2007 mit einem durchschnittlichen Wert von 45,6 %. Im Sommerweizen war die Ertragswirkung in beiden Jahren höher als im Silomais. Im Mittel über beide Jahre und alle Gärprodukte lag der relative Ertrag für Sommerweizen bei 60,4 % und beim Mais bei 36,6 %. Insbesondere die GP B und C wiesen beim Mais mit Werten zwischen 11 und 32 % sehr geringe N-Düngewirkungen auf.

4.2.4 Erträge von Silomais und GPS-Roggen in Praxisfeldversuchen

Zur Validierung der Ergebnisse aus den Parzellenfeldversuchen wurden zwei der drei Gärprodukte auch unter Praxisbedingungen getestet. Im Folgenden wird auf die Erträge von Silomais und zur Milchreife geerntetem Roggen für Ganzpflanzensilage (GPS) aus den Praxisversuchen an den Standorten Dolgeln und Püggen eingegangen. In Dolgeln wurde das GP A in den Kulturen Silomais und GPS-Roggen als Dünger getestet. In Püggen wurde das GP B in Silomais eingesetzt. Geplant war ein einfaktorieller Versuchsansatz mit dem Faktor N-Aufwandmenge, welcher in den Stufen 0, 50, 100 und 150 kg ha⁻¹ angelegt werden sollte. Aufgrund der bereits bei den Parzellenfeldversuchen erwähnten Fehler bei der N-Analyse wurden an beiden Standorten im Jahr 2006 andere N-Mengen ausgebracht.

Die Ertragsergebnisse der Versuche mit Roggen und Mais am Standort **Dolgeln** sind für die beiden Versuchsjahre 2006 und 2007 in der Tabelle 4-9 dargestellt.

Tabelle 4-9: Silomaiserträge (TM) und GPS-Roggenerträge (TM) im Praxisversuch am Standort Dolgeln in den Jahren 2006 und 2007 in Abhängigkeit von der N-Aufwandmenge des hofeigenen Gärproduktes (GP A)

Mittelwerte innerhalb eines Versuchs mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant voneinander, Tukey-Test mit $\alpha = 0,05$; n = 5 (unechte Wiederholungen)

Jahr	N-Aufwandmenge [kg ha ⁻¹]	GPS-Roggenertrag [dt ha ⁻¹ TM]	Silomaisertrag [dt ha ⁻¹ TM]
2006	0	97,3 ^a	117,6 ^a
	74	95,4 ^a	138,7 ^a
	148	108,2 ^a	118,8 ^a
	222	113,5 ^a	152,4 ^a
2007	0	46,8 ^a	114,4 ^a
	50	66,1 ^{ab}	153,6 ^a
	100	94,5 ^{bc}	172,3 ^a
	150	110,2 ^c	186,1 ^a

Der **GPS-Roggen** erzielte im Jahr **2006** standorttypische Trockenmasseerträge zwischen 95 und 114 dt ha⁻¹. Die Unterschiede zwischen den Erträgen der verschiedenen N-Aufwandmengen waren relativ gering und nicht signifikant. Die Mehrerträge durch Düngung gegenüber der Kontrolle betrugen zwischen 11 und 17 %. Im Jahr **2007** waren die Erträge der Variante mit der N-Aufwandmenge 150 kg ha⁻¹ mit 110 dt ha⁻¹ TM ähnlich hoch wie im Vorjahr. Die Kontrollvariante wies mit 47 dt ha⁻¹ TM deutlich geringere Erträge auf als im Jahr 2006. Die Mehrerträge durch Düngung mit 50 bis 150 kg ha⁻¹ N aus GP A betrugen somit zwischen 41 und 136 %, wobei der Unterschied zur Kontrolle bei den Aufwandmengen 100 und 150 kg ha⁻¹ N signifikant war.

Der **Silomais in Dolgeln** erreichte **2006** Erträge zwischen 118 und 152 dt ha⁻¹ TM. Diese Werte sind wie auch in den Parzellenfeldversuchen, bedingt durch den trockenen Sommer, relativ gering. In der mit 222 kg ha⁻¹ N sehr hoch gedüngten Variante wurde ein Mehrertrag gegenüber

der Kontrolle von 30 % erreicht, der jedoch nicht signifikant war. Besonders gering fiel der Mehrertrag der 148 kg ha⁻¹ N-Variante mit nur 1 % aus. Im Jahr **2007** war der Ertrag in der Kontrollvariante mit 114 dt ha⁻¹ TM mit dem aus dem Vorjahr vergleichbar. In den gedüngten Varianten wurden mit bis zu 186 dt ha⁻¹ TM, bedingt durch die hohen Niederschläge während der Hauptwachstumszeit, höhere Erträge als im Vorjahr erreicht. Die Mehrerträge lagen zwischen 34 und 63 %, waren jedoch auch hier nicht signifikant.

Am Standort **Püggen** erbrachte der **Silomais** im Jahr **2006** Trockenmasseerträge zwischen 75 und 92 dt ha⁻¹ (Tabelle 4-10).

Tabelle 4-10: Silomaiserträge (TM) im Praxisversuch am Standort Püggen in den Jahren 2006 und 2007 in Abhängigkeit von der N-Aufwandmenge des hofeigenen Gärproduktes (GP B)

Mittelwerte innerhalb eines Versuchs mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant voneinander, Tukey-Test mit $\alpha = 0,05$; n = 5 (unechte Wiederholungen)

Jahr	N-Aufwandmenge [kg ha ⁻¹]	Silomaisertrag [dt ha ⁻¹ TM]
2006	0	91,5 ^a
	48	82,7 ^a
	145	84,1 ^a
	184	75,0 ^a
2007	0	131,6 ^a
	50	143,1 ^a
	100	154,4 ^a
	150	105,3 ^a

Gemessen an den Erträgen in Dolgeln entsprach dies im Mittel über die Varianten 63 %. Im Gegensatz zu allen anderen bisher beschriebenen Versuchen wurde der höchste Ertrag mit 92 dt ha⁻¹ TM durch die ungedüngte Kontrolle erreicht. In den Varianten mit den Aufwandmengen 48 und 145 kg ha⁻¹ N wurden mit 82,7 und 84,1 dt ha⁻¹ TM nur 90 bis 92 % des Silomaisertrags der Kontrollvariante geerntet. Den geringsten Ertrag erbrachte die Variante mit der Aufwandmenge 184 kg ha⁻¹ N mit nur 75 dt ha⁻¹ TM. Das entspricht einer Ertragsminderung um 18 % gegenüber der Kontrolle.

Im Versuchsjahr **2007** waren die Silomaiserträge mit 105 bis 154 dt ha⁻¹ TM auf einem höheren Niveau als im Vorjahr. Ursache war, wie bei den anderen Versuchen, der niederschlagsreiche Sommer. Ein durchgängig negativer Trend mit steigender N-Düngung konnte nicht beobachtet werden. Die N-Aufwandmengen 50 und 100 kg ha⁻¹ erbrachten mit 143,1 und 154,4 dt ha⁻¹ TM Mehrerträge gegenüber der Kontrollvariante von 9 und 17 %. Die hohe Aufwandmenge von 150 kg ha⁻¹ N erbrachte jedoch mit 105 dt ha⁻¹ TM und einer Ertragsminderung um 20 % gegenüber der Kontrolle den mit Abstand geringsten Ertrag. Die Mittelwerte der vier Düngevarianten unterschieden sich nicht signifikant voneinander.

Die Ergebnisse aus den **Praxis- und Parzellenfeldversuchen** sind nicht direkt miteinander vergleichbar, da die Versuchsbedingungen, insbesondere Versuchsanlage, Klima und Boden,

unterschiedlich waren. Die Wirkungen der beiden Gärprodukte wurden somit unter verschiedenen Versuchsbedingungen getestet, was für eine fundierte Einschätzung und Beurteilung wichtig ist. Anders als bei den Maisversuchen in Püggen mit dem GP B war die Höhe der Ertragssteigerung durch das GP A in Dolgeln mit denen in den Parzellenfeldversuchen vergleichbar. Das GP B erbrachte in den Parzellenfeldversuchen von allen Düngern die geringsten Ertragssteigerungen gegenüber der Kontrolle, jedoch in keinem Fall eine Ertragsminderung wie im ersten Versuchsjahr des Praxisversuchs.

Die Flächen der Praxisversuche wurden in den Jahren vor der Versuchsdurchführung bereits mehrfach mit Gärprodukten gedüngt. Somit war auf allen Flächen mit einer Nährstoffnachlieferung aus der organischen Substanz zu rechnen. Dies erklärt die zum Teil geringen Unterschiede zwischen den gedüngten Varianten und der Kontrolle. Der Roggenversuch in Dolgeln wurde im Jahr 2007 exakt auf die Fläche platziert, auf der im Vorjahr der Maisversuch durchgeführt wurde. Die Versuchsdauer war in diesem Fall zweijährig. Der mehrjährige Versuchsansatz führte im zweiten Jahr zu größeren Unterschieden zwischen den Düngevarianten. Die hochgedüngten Varianten erbrachten in beiden Jahren ähnliche Erträge, die Kontrolle lieferte aber im zweiten Jahr deutlich geringere Erträge als im Vorjahr.

5 DISKUSSION

Nachhaltige Entwicklung ist eine grundlegende Voraussetzung für die Zukunftsfähigkeit moderner Volkswirtschaften. Dazu gehört, dass anstatt endlicher fossiler Energieträger schrittweise **erneuerbare Energien** genutzt werden. Die sich stetig reduzierenden fossilen Energieträger und die immer deutlicher zum Vorschein kommenden Zeichen des Klimawandels führen dazu, dass dieser Wechsel in historisch kurzer Zeit vollbracht werden muss. Aus diesem Grund hat sich die Bundesregierung ehrgeizige Ziele zur Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien gesetzt und entsprechende Maßnahmen zur Erreichung dieser Ziele initiiert (BMWi & BMU, 2007). So wird z. B. die Einführung verbesserter Technologien gefördert, um deren Markteinführung zu beschleunigen und den Ausstoß klimarelevanter Gase zu reduzieren. Außerdem soll die Anzahl der Beschäftigten auf diesem Gebiet zunehmen. Für die Landwirtschaft bringen die neuen gesetzlichen Regelungen durch den vermehrten Energiepflanzenanbau sowohl aus ökonomischer als auch aus ökologischer Sicht gravierende Veränderungen mit sich. Eine ganzheitliche Betrachtung und Bewertung der Erneuerbare-Energien-Technologien ist aus diesem Grunde von großer Bedeutung.

Um die energetische Nutzung **nachwachsender Rohstoffe** zur Biogasgewinnung nachhaltig zu gestalten, ist nicht nur eine effiziente Umwandlung der in der Biomasse gespeicherten Energie, sondern auch die Rezyklierung im Gärprodukt verbleibender Pflanzennährelemente und organischer Substanz innerhalb des landwirtschaftlichen Produktionssystems von Bedeutung. Beim Biogasprozess sollte neben der Energieproduktion die Verwertung von Gärprodukten als ein wichtiges Ziel betrachtet und weiterentwickelt werden.

Die in der vorliegenden Arbeit dargestellten **Versuche hatten zum Ziel**, die Auswirkungen der Nutzung von Gärprodukten aus der Biogasproduktion als Dünger im Pflanzenbau zu untersuchen. Dabei wurden sowohl ökologische als auch ökonomische Effekte, d. h. die Wirkung auf bodenchemische und -biologische Parameter sowie auf Wachstum, Ertrag und Qualität verschiedener Kulturpflanzen, betrachtet. Die entsprechenden in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen werden im Folgenden im Hinblick auf die Beantwortung der im einleitenden Kapitel aufgeworfenen Fragen und der gestellten Hypothese diskutiert.

5.1 Wirkungen der Gärproduktdüngung auf den Boden

Bei der Bewertung der Wirkungen von Gärprodukten auf den Boden steht die Frage im Vordergrund, ob mit der Düngung die Bodenfruchtbarkeit erhalten bleibt. Auf längere Sicht sollte beim Anbau von Energiepflanzen und dem Einsatz von Gärprodukten als Dünger darauf geachtet werden, dass der pH-Wert des Bodens, seine Gehalte an Pflanzennährstoffen sowie die Aktivität von Mikro- und Makrofauna nicht abnehmen. Mit der Zunahme des Maisanbaus hat auch die

Erhaltung des Humusgehaltes der Böden als wichtiger Parameter der Bodenfruchtbarkeit an Bedeutung zugenommen.

5.1.1 Bodenchemische Parameter

Anhand der verfügbaren Literatur wurde die Hypothese erstellt, dass nach nur zwei Jahren Gärproduktanwendung die Gehalte und Verfügbarkeiten von Nährstoffen im Boden sowie der pH-Wert des Bodens kaum verändert werden. Dies ist damit begründet, dass zum einen die gedüngten Nährstoffe von den Pflanzen aufgenommen oder im Boden zu anderen Verbindungen umgesetzt werden. Zum anderen können mit der Düngung zugeführte Nährstoffe bis zur Bodenuntersuchung bereits aus dem Oberboden verlagert worden sein oder sie werden von der bei der Untersuchung verwendeten Extraktionslösung nur unvollständig erfasst (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002). Die gestellte Hypothese konnte durch die Versuchsergebnisse bestätigt werden. Der Einsatz von Gärprodukten zur Düngung der Kulturen Silomais und Sommerweizen führte im Verlauf von zwei Versuchsjahren zu einer geringen Anzahl messbarer bzw. statistisch signifikanter Wirkungen auf die untersuchten bodenchemischen Parameter. Boden ist ein inhomogenes Medium mit einem großen Puffervermögen für viele Stoffe, in dem witterungsabhängige Umsetzungsprozesse im Laufe eines Jahres stattfinden. Viele bewirtschaftungsbedingte Auswirkungen auf den Boden sind somit erst nach mehreren Jahren nachweisbar.

Insbesondere die Gesamtgehalte an Kohlenstoff und Stickstoff wurden durch die Düngung über zwei Versuchsjahre kaum verändert. Ebenfalls wenige Veränderungen bezüglich bodenchemischer Parameter wurden von ODLARE *et al.* (2008) nach einer vierjährigen Anwendung von Gärprodukten festgestellt. Eine Berechnung der theoretischen Veränderungen der C- und N-Gehalte durch die Düngung macht deutlich, dass nur geringe Veränderungen der Gesamtgehalte im Boden zu erwarten sind. Bei Ausgangsgehalten des Bodens von 1,10 % C_{ges} und 70 mg 100 g⁻¹ N_{ges} erhöht eine Gärproduktgabe mit einer Fracht von 1 t C und 150 kg N je Hektar diese Gehalte theoretisch auf 1,13 % C_{ges} bzw. 74 mg 100 g⁻¹ N_{ges}. Ein Teil der zugeführten organischen Substanz wird bereits wenige Tage nach der Düngerausbringung mikrobiell abgebaut und Nährstoffe werden von den Pflanzen aufgenommen und mit der Ernte abgefahren. Somit fällt die im Herbst messbare tatsächliche Anhebung der C- und N-Gehalte noch geringer bzw. teilweise sogar negativ aus. Solch minimale Unterschiede sind im Zusammenhang mit großer räumlicher und zeitlicher Variabilität auf den Ackerschlägen (KÖRSCHENS, 1980), den Nachweisgrenzen bei der Analytik sowie der Ungenauigkeiten bei den Probenahmen oft nicht mehr nachweisbar. Dauerhaft höhere C-Gehalte und damit ein stabiles Fließgleichgewicht stellen sich bei gleichmäßiger und hoher C-Zufuhr durch organische Düngung erst nach einem langen Zeitraum, etwa nach 50 Jahren, ein. Soll der C-Gehalt dauerhaft erhöht werden, so muss dauerhaft eine hohe C-Zufuhr gewährleistet sein (KÖRSCHENS, 1980 und 1997).

Ein Versuchsergebnis bezüglich der Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte des Bodens war, dass die heißwasserlöslichen C- und N-Gehalte im ersten Versuchsjahr durch die organische Düngung erhöht wurden, dieser Effekt aber im zweiten Versuchsjahr nicht mehr erkennbar war. Zum einen war das Ertragsniveau im ersten Versuchsjahr deutlich höher, wodurch mit der Düngung wahrscheinlich auch mehr Wurzelmasse gebildet und damit Kohlenstoff im Boden gespeichert wurde. Zum anderen war in diesem Jahr die Witterung während der Sommermonate heiß und trocken, so dass die Umsetzungs- und Abbauprozesse im Boden wahrscheinlich langsam vonstatten gingen. Im Folgejahr war das Ertragsniveau durch die Frühjahrstrockenheit gering, die Sommermonate demgegenüber durch hohe Niederschlagsmengen und kühle Witterung geprägt. Dadurch könnten möglicherweise vorhandene Unterschiede im Kohlenstoffgehalt des Bodens durch rasche Umsetzungsprozesse im Herbst nicht mehr nachweisbar gewesen sein.

Eine tendenziell positive Wirkung der Gärprodukte auf die Kohlenstoffgehalte des Bodens konnte also nur teilweise nachgewiesen werden. Aussagen über das Humusreproduktionsvermögen von Gärprodukten sind anhand der zweijährigen Parzellenfeldversuche nicht möglich, hierfür sind z. B. langjährige Dauerfeldversuche notwendig.

In der VDLUFA-Humusbilanzierung werden Gülle und flüssige Gärprodukte bezüglich ihres Humusreproduktionsvermögens bezogen auf die aufgewendete Frischmasse gleichgesetzt. Bei gleicher N-Menge gelangt durch das enge C/N-Verhältnis der Gärprodukte in der Regel weniger Kohlenstoff auf den Acker als bei einer Düngung mit Gülle oder Stallmist. Dafür ist aber die enthaltene organische Substanz in Gärprodukten deutlich stabiler als die in Rindergülle, wie Untersuchungen von REINHOLD (1988) und SENSEL *et al.* (2011) zeigen. Somit ist nicht nur die Menge an Gesamtkohlenstoff in organischen Düngern für die Humusreproduktion von Bedeutung, sondern auch deren Qualität bzw. Zusammensetzung. Für eine Aussage über die Wirkung von Gärprodukten, sowohl aus der Gülle- als auch aus der Energiepflanzenvergärung, auf den Humushaushalt der Böden nach langjähriger Anwendung fehlen bisher Dauerfeldversuche, so wie es sie für andere Wirtschaftsdünger wie Gülle und Stallmist bereits gibt.

Auffallend bei den N-Fractionen war, dass in den mineralisch gedüngten Varianten die N_{\min} -Gehalte in den meisten Fällen höher, die N_{ges} -Gehalte demgegenüber geringer als in den mit Gärprodukten gedüngten Varianten waren. Der N_{\min} -Anteil an N_{ges} im Boden war damit durchgehend höher als in den mit Gärprodukten gedüngten Varianten. Die Unterschiede zwischen den Gehalten waren allerdings nicht signifikant. Da die N-Zufuhr in allen Parzellen gleich hoch war, ist der geringere N_{ges} -Gehalt in den MD-Parzellen durch das höhere Ertragsniveau der mineralisch gedüngten Varianten zu erklären. Hier wurde mehr Stickstoff mit dem Erntegut abgefahren. Der höhere mineralisierte Anteil lässt sich demgegenüber durch die wahrscheinlich größere gebildete Wurzelmasse in den mineralisch gedüngten Parzellen erklären, welche nach der Ernte zu höheren Umsetzungsraten im Boden führt.

Im Herbst 2007 war im Fruchtfolgepaar Silomais-Sommerweizen der N-Gehalt im Mittel über die vier Dünger in den gedüngten Parzellen deutlich höher als in den Kontrollparzellen. Dies ist wahrscheinlich durch die insgesamt sehr geringen N-Entzüge in diesem Jahr bedingt, welche sich aus dem niedrigen Ertragsniveau des Sommerweizens ergaben. Die auf den gedüngten Parzellen ausgebrachten N-Mengen konnten aufgrund der Frühjahrstrockenheit in diesem Jahr von den Pflanzen nicht verwertet werden. Dieses Ergebnis spiegelt sich auch in den positiven Nährstoffbilanzen für den Sommerweizen im Jahr 2007 wider (s. u.).

Die in den Parzellenfeldversuchen festgestellten Veränderungen in den **P- und K-Gehalten des Bodens** lassen sich insbesondere auf die zu hoch ausgebrachte Ausgleichsdüngung in den Mineraldüngervarianten zurückführen. Auf den P-Gehalt des Bodens hatte die Düngung mit Gärprodukten keinen messbaren Effekt. Der K-Gehalt wurde durch die Düngung mit den GP B und C zum Teil erhöht. Im ersten Versuchsjahr wurde auf den mit ca. $150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ gedüngten Parzellen durch das GP C bereits mit $355 \text{ kg ha}^{-1} \text{ K}$ deutlich mehr ausgebracht als auf den entsprechenden Parzellen der GP A und B mit 213 bzw. $215 \text{ kg ha}^{-1} \text{ K}$. Im zweiten Versuchsjahr wurden mit den GP B und C mit 182 bzw. 173 kg ha^{-1} ebenfalls mehr K ausgebracht als durch GP A mit 132 kg ha^{-1} . Durch den hohen N-Gehalt in GP A war die Nährstofffracht für P und K bei der Ausbringung geringer.

Ein vergleichbares Ergebnis fanden ODLARE *et al.* (2008), bei denen nach vier Jahren Düngung mit Gärprodukt kein Effekt auf den P-Gehalt des Bodens, jedoch eine signifikante Erhöhung des K-Gehaltes gemessen wurde. UNTERFRAUNER *et al.* (2010) legten einen Schwerpunkt auf die Untersuchung des K-Haushalts des Bodens nach der Gärprodukt-Ausbringung und fanden ebenfalls erhöhte Werte gegenüber der ungedüngten Kontrolle. Der Anteil des Kaliums an der Kationenaustauschkapazität erhöhte sich zwei Wochen nach der Ausbringung von 7,8 auf 9,8 %. Nach 17 Wochen war der Wert weiter auf 11,2 % gestiegen, nach 20 Wochen wieder auf 10,2 % gesunken. Als negative Folge der hohen K-Fracht stellten sie eine Absenkung des pH-Wertes fest (s. u.), welche laut der Autoren eine Folge der Mobilisierung der vorher an den Austauschern adsorbierten Säure ist.

In den durchgeführten Parzellenfeldversuchen wurde der **pH-Wert** des Bodens durch die Düngung mit Gärprodukten tendenziell besser erhalten als durch die Düngung mit Kalkammonsalpeter. Signifikante Effekte gab es jedoch kaum. Die deutlichsten Unterschiede gab es zwischen den Frühjahrs- und Herbstprobenahmen, diese waren somit jahreszeitlich bedingt. ODLARE *et al.* (2008) fanden ebenfalls keinen signifikanten Effekt einer Gärproduktdüngung auf den pH-Wert des Bodens in den über vier Jahre durchgeführten Feldversuchen. In Versuchen von UNTERFRAUNER *et al.* (2010) verringerte sich demgegenüber 17 bzw. 20 Wochen nach der Ausbringung von Gärprodukt aus der Vergärung von Maissilage und Schweinegülle der pH-Wert im Boden von 5,7 auf 5,4. Sie begründeten dies mit dem Anstieg der K-Konzentration in der Bodenlösung, welche durch die Adsorption an den Austauschkomplexen zu

einer Mobilisierung der leicht austauschbaren Säure führt. Bezüglich der Abläufe im Boden, die nach einer Düngung zu einem spezifischen pH-Wert des Bodens führen, sind nicht die pH-Werte der Dünger selbst entscheidend, sondern die Um- und Abbauprozesse, Reaktionen und Wechselwirkungen im Boden, die eine Düngung nach sich zieht. Neben den oben genannten Austauschvorgängen an den Sorptionskomplexen spielt die Form der N-Aufnahme durch die Pflanzen eine entscheidende Rolle, da sowohl die Aufnahme von Ammonium als auch N-Verluste durch Ammoniak und die Auswaschung von Nitrat im Endeffekt zu einer Bodenversauerung führen. Durch die Mineralisierung bzw. im Speziellen die Nitrifikation wird Ammonium in der Regel rasch zu Nitrat umgesetzt. Über die im Boden abgelaufenen den pH-Wert beeinflussenden Prozesse nach der Ausbringung von Gärprodukten kann im Rahmen dieser Arbeit keine Aussage getroffen werden, da diese nicht genauer untersucht wurden.

5.1.2 Mikrobielle Aktivität

Die Wirkung der Gärprodukte auf bodenchemische und bodenbiologische Parameter hängen eng zusammen, da bodenchemische Faktoren die Mikroorganismen und die Makrofauna des Bodens sowohl direkt als auch indirekt über das Pflanzenwachstum beeinflussen können.

In Versuchen von TERHOEVEN-URSELMANS *et al.* (2009) und ERNST *et al.* (2008) war die Bodenatmung direkt nach der Düngung mit Gärprodukten deutlich erhöht gegenüber einem unbehandelten Kontrollboden. Eine ähnliche Vergleichsmessung im Labor mit Bodenproben, die erst vier Wochen nach der Ernte genommen wurden, zeigte demgegenüber keine Unterschiede zwischen den Varianten (ODLARE *et al.*, 2008). Von negativen Effekten durch Gärprodukte auf die Bodenatmung wurde in der Literatur bisher nicht berichtet. Somit wurde bezüglich der Fragestellung, ob die Düngung mit Gärprodukten die mikrobielle Aktivität des Bodens beeinflusst, die **Hypothese** aufgestellt, dass eine zeitlich begrenzte Erhöhung der Bodenatmung messbar sein wird und die Aktivität der Bodenmikroorganismen durch Gärprodukte deutlich stärker gefördert wird als durch Kalkammonsalpeter.

Die Zufuhr von GP A zum Boden bewirkte sowohl im Sommerweizen- als auch im Silomaisfeld in beiden Jahren für einige Zeit, je nach Kultur und Jahr zwischen vier und elf Wochen, einen **positiven Effekt auf die Bodenatmung** im Vergleich zur Kontrolle. Außer im Maisfeld im Jahr 2007 hatte der Mineraldünger den gleichen oder sogar einen stärker positiven Effekt. Erst im zweiten Versuchsjahr wurde mit den Messungen der Bodenatmung bereits einen Tag nach der Ausbringung der Dünger begonnen. Hier konnte insbesondere im Sommerweizenfeld gezeigt werden, dass die Bodenatmung während eines Zeitraums von wenigen Tagen nach der Ausbringung durch das Gärprodukt deutlich stärker gefördert wird als durch Kalkammonsalpeter. In einigen Fällen war die Bodenatmung mehrere Wochen nach der Ausbringung leicht verringert gegenüber den Kontrollvarianten. Die gemessenen Unterschiede konnten u. a. aufgrund der Wahl der Versuchsanlage nicht statistisch bestätigt werden.

Ein Grund dafür, dass ein stärker fördernder Effekt der Gärprodukte gegenüber dem Mineraldünger nur in einer sehr kurzen Zeit nach der Düngerausbringung gemessen werden konnte, ist wahrscheinlich, dass die leicht verfügbare Substanz im Gärprodukt sehr schnell abgebaut wurde. Dies könnte ein Hinweis dafür sein, dass ein Großteil der **organischen Substanz in den Gärprodukten schwer abbaubar ist**. Eine höhere Abbaustabilität der organischen Substanz in Gärprodukten gegenüber anderen organischen Düngern bzw. den Ausgangssubstraten fanden auch ASMUS *et al.* (1988), REINHOLD *et al.* (1991), MARCATO *et al.* (2009), DE NEVE *et al.* (2003) sowie SENSEL *et al.* (2011). Über diese Aussage hinaus ist anhand der Versuche über die Stabilität der organischen Substanz der Gärprodukte keine weitere möglich, da die Messungen im Freiland von zu vielen nicht quantifizierbaren Faktoren beeinflusst werden.

Bodenmikroorganismen, die den mineralischen Stickstoff aus Kalkammonsalpeter zur Energiegewinnung nutzen können, sind unter aeroben Bedingungen die chemolithoautotrophen Nitrifizierer. Da bei der Nitrifikation, also der Oxidation von Ammoniak zu Nitrit und weiter zu Nitrat, kein CO₂ entsteht, wird die Aktivität dieser Mikroorganismen bei der Messung der Bodenatmung nicht mit erfasst. Dass der mineralische N-Dünger, abgesehen von der starken Bodenatmungsförderung in den ersten wenigen Tagen nach der Düngerausbringung in den Gärproduktvarianten, den gleichen positiven Effekt auf die Bodenatmung hatte wie das mineralisch-organische Gärprodukt, macht deutlich, dass die Aktivität der CO₂-exhalierenden Bodenmikroorganismen nicht nur durch die direkte Zufuhr der organischen Substanz des Düngers gefördert wird. Das durch die Düngung gesteigerte Pflanzenwachstum und die dadurch erhöhten Wurzelausscheidungen der Kulturpflanzen bewirken ebenfalls eine Zunahme der organischen Substanz im Boden, welche die mikrobielle Aktivität fördert. Nach KUZYAKOV (2006) stellt die Basalrespiration in einem unbewachsenen Feld die einzige Quelle für CO₂-Efflux aus dem Boden dar. Mit dem Bewuchs von Pflanzen wird dieser Abbau der „alten“ organischen Bodensubstanz durch die Zufuhr frischer Wurzeln und Pflanzenreste erhöht, was vom Autor als „**Rhizosphären Priming Effekt**“ bezeichnet wird. Zusätzlich nimmt der CO₂-Efflux durch die mikrobielle Umsetzung des toten Pflanzenmaterials und der Wurzel Ausscheidungen zu („**rhizomikrobielle Respiration**“). Hinzu kommt CO₂ aus der nicht mikrobiell erzeugten **Wurzelatmung**. Somit wird deutlich, dass der Pflanzenbewuchs die an der Bodenoberfläche gemessene Bodenatmung stark beeinflussen kann.

Auch die Zufuhr von organischen Düngern zum Boden bewirkt einen **Priming Effekt**, also eine vermehrte Umsetzung der „alten“ organischen Bodensubstanz (DALENBERG & JAGER, 1989; KUZYAKOV *et al.*, 2000). Der Priming Effekt ist möglicherweise auch die Ursache für die gegenüber der Kontrolle verringerte Bodenatmung in den gedüngten Varianten zum Ende der Messperiode. Durch die anfänglich hohen Umsetzungsraten der Mikroorganismen und die dadurch reduzierte OBS könnte nach Verbrauch der leicht umsetzbaren organischen Substanz weniger organisches Material zur Mineralisierung zur Verfügung gestanden haben, so dass die Boden-

atmung gegenüber der ursprünglichen Höhe zurückgeht. Der negative Effekt der Mineraldüngervariante im Maisfeld im Jahr 2006 könnte durch einen geringen Bodenwassergehalt, welcher wahrscheinlich durch das hohe Pflanzenwachstum entstanden ist, bedingt sein. Steigende Temperaturen fördern bis zu einem bestimmten Bereich die Bodenatmung. Die Bodenfeuchte beeinflusst die Mikroorganismen dahingehend, dass unter einem bestimmten Schwellenwert die Umsetzungsprozesse im Boden stark eingeschränkt bzw. eingestellt werden (u. a. DAVIDSON *et al.* 1998).

Die Vermutung, dass die Bodenatmung durch den Mineraldünger im Feld über die Förderung des Pflanzenwachstums erhöht wird, kann durch das Ergebnis des durchgeführten **Laborversuchs** bestätigt werden. Unter definierten Versuchsbedingungen konnten Temperatur, Wassergehalt sowie Pflanzenbewuchs als die Bodenatmung beeinflussenden Faktoren ausgeschlossen werden. Nur die Gärproduktvariante führte zu einer Erhöhung der CO₂- und der CH₄-Exhalation gegenüber der Kontrolle über den gesamten Versuchszeitraum von 19 Tagen. Die Mineraldüngervariante verhielt sich ähnlich wie die Kontrollvariante. Nach 19 Tagen waren ca. 31 % der durch Gärprodukte zugeführten organischen Substanz zu CO₂ abgebaut. Dies liegt in dem Bereich zwischen 12 und 32 %, der in der Literatur gefunden wird (MARCATO *et al.*, 2009; ASMUS *et al.*, 1988; DE NEVE *et al.*, 2003, SENSEL *et al.*, 2011). Ein geringer Anteil von < 0,1 % des emittierten Kohlenstoffs machte davon das gebildete CH₄ aus.

Aus den durchgeführten Versuchen kann zum einen abgeleitet werden, dass durch die Zufuhr von Gärprodukten zum Boden die mikrobielle Aktivität kurzfristig gefördert wird und somit keine Stoffe enthalten sind, die in der zugeführten Dosis toxisch oder hemmend auf die Bodenmikroorganismen wirken. Aus den Ergebnissen kann des Weiteren geschlussfolgert werden, dass im Feld der CO₂-Efflux, welcher aus der Umsetzung des organischen Materials im Gärprodukt resultiert, einen geringen Teil der Gesamtemission ausmacht. Sowohl in den mit Gärprodukt als auch in den mineralisch gedüngten Varianten war die Erhöhung der Bodenatmung zum größten Teil durch die Förderung des Pflanzenwachstums bedingt. Der größte Teil der Mineralisierung der organischen Substanz aus dem Gärprodukt findet in den ersten wenigen Tagen nach der Ausbringung statt. Im Laborversuch sind nach 19 Tagen ca. 31 % des zugeführten Kohlenstoffs umgesetzt. Welcher Anteil langfristig zur Humusreproduktion beiträgt, kann aus den durchgeführten Versuchen nicht abgeleitet werden. Hierzu sind langjährige Feldversuche notwendig.

5.1.3 Abundanz, Biomasse und Artenverteilung von Regenwürmern

Zu der Frage, welche Wirkungen Gärprodukte auf die Bodenmakrofauna haben, wurde aufgrund der bisherigen Literatur zu diesem Thema (vgl. Kapitel 2.6.3) die **Hypothese** erstellt, dass für die durchgeführten Versuche mit einer tendenziell positiven Wirkung auf die Regenwürmer zu rechnen ist.

In den verschiedenen durchgeführten Versuchen konnte die **positive Wirkung** lediglich im Vermeidungstest mit der Kompostwurmart *Eisenia fetida* bei einer geringen Aufwandmenge von 6,2 g FM je 500 g Boden bestätigt werden. Diese Gärproduktmenge führte zu einer Bevorzugung des mit dem GP A versetzten Prüfbodens, in dem sich etwa 2/3 der eingesetzten Regenwürmer zum Zeitpunkt der Auszählung befanden. Ebenfalls einen positiven Effekt einer Gärproduktausbringung auf die Regenwurmabundanz bzw. die Biomasse der Regenwürmer stellten BERMEJO *et al.* (2010), BRAUCKMANN & BROLL (2007) sowie ERNST *et al.* (2008) fest. Auch für verschiedene Wirtschaftsdünger wie Stallmist oder Gülle wird von einem positiven Effekt auf die Abundanz von Regenwürmern berichtet (EDWARDS & BOHLEN, 1996; LEROY *et al.*, 2007; EDWARDS & LOFTY, 1982; UNWIN & LEWIS, 1986), wobei insbesondere die Verfügbarkeit des Kohlenstoffs eine Rolle spielt (TIUNOV & SCHEU, 2004; ERNST *et al.*, 2008). Über eine negative oder toxische Wirkung von Gärprodukten auf Regenwürmer wurde bisher nicht berichtet. Es gibt jedoch Untersuchungen, die zeigen, dass die organische Substanz durch Stabilisierung mittels anaerober Behandlung oder auch nach Kompostierung für Regenwürmer weniger verfügbar ist und somit keine gute Nahrungsgrundlage darstellt (LEROY *et al.*, 2008, KAPLAN *et al.*, 1980). Der positive Effekt kann aber dennoch mit der Zufuhr von Nährstoffen und organischer Substanz erklärt werden, da auch die dadurch geförderten Mikroorganismen eine gute Nahrungsgrundlage für die Regenwürmer darstellen (GRAFF, 1983).

Eine **negative Wirkung** hatten die Gärprodukte in den durchgeführten Versuchen demgegenüber sowohl auf die Kompostwürmer im Vermeidungstest mit der hohen Aufwandmenge als auch auf die Regenwürmer im Sommerweizenfeld zwei Wochen nach der Ausbringung. Die Zufuhr der sehr hohen Dosis Gärprodukt im zweiten Vermeidungstest hatte eine 100%ige Vermeidung des Prüfbodens durch die Würmer zur Folge. Das Gärprodukt wirkte somit nach der Definition von HUND-RINKE & WIECHERING (2001) in dieser Konzentration toxisch auf die Würmer. Von den verwendeten Gärprodukt-Aufwandmengen auf mögliche Grenzwerte zu schließen, die im Feld negative Effekte haben könnten, ist sehr schwierig aber in diesem Fall auch nicht sinnvoll, da mit *E. fetida* für den Vermeidungstest eine für Ackerboden nicht typische Art verwendet wurde. Diese Kompostwurmart wies in verschiedenen Versuchen deutlich geringere Empfindlichkeiten gegenüber Substanzen wie z. B. die Insektizide Parathion, Propoxur (KULA & KOKTA, 1992) und Chlorpyrifos (MA & BODT, 1993), dem Schwermetall Zink (SPURGEON & HOPKIN, 1996) sowie hohen Salzgehalten (GRAFF, 1983; OWOJORI & REINECKE, 2009) auf als Arten, die in Ackerböden vorkommen.

Im Feld führte die Düngung mit GP A zu einer tendenziellen Abnahme der Regenwurmdichten, welche bis zu 27 % durch die höchste Aufwandmenge erreichte. Der negative Effekt war bei den Juvenilen deutlicher als bei den Adulten und bei der Art *A. icterica* stärker als bei *A. caliginosa*. Demgegenüber war die durchschnittliche Masse je Tier in der hochgedüngten Variante 17 % höher als in der Kontrollvariante. Signifikant waren die Unterschiede zwischen

den vier Varianten in keinem Fall. Auch COTTON & CURRY (1980) beobachteten den Effekt, dass Adulte und größere Arten in Versuchen mit Schweinegülle weniger reduziert wurden als Juvenile und kleinere Arten. Ebenfalls wurde der Effekt beobachtet, dass die durchschnittliche Biomasse je Tier in den mit hohen Aufwandsmengen gedüngten Parzellen im Gegensatz zur Anzahl der Regenwürmer zunahm. Dies erklärt sich durch die höhere Anzahl adulter Tiere in den hochgedüngten Varianten, da diese eine höhere Biomasse haben als juvenile. Die größere Sensibilität juveniler Regenwürmer im Vergleich zu den adulten kommt möglicherweise dadurch zustande, dass diese sich vermehrt an der Ackeroberfläche aufhalten, wo sie Umwelteinflüssen stärker ausgesetzt sind als die Tiere in tieferen Bodenschichten (EDWARDS & BOHLEN, 1996). Möglich wäre auch eine bessere Schutzfunktion durch die Haut bei adulten Tieren. In Versuchen mit Methylquecksilberchlorid fand man eine geringere Sensibilität für adulte Regenwürmer der Art *E. andrei*, welche nach Meinung der Autoren durch eine besser ausgebildete Immunkompetenz begründet war (SAUVÉ & FOURNIER, 2005). Die Verschiebung in der Artenzusammensetzung der beiden hauptsächlich gefundenen Arten macht deutlich, dass *A. caliginosa* weniger empfindlich auf das Gärprodukt reagierte als *A. icterica*. Die Art *A. caliginosa* kommt fast unter allen Standortbedingungen vor. Sie weist sehr geringe spezifische Ansprüche an die Nahrung (BERNIER, 1998) bzw. hohe Toleranzen an die Umweltbedingungen im Boden auf. Nach BOUCHÉ (1972) weist *A. caliginosa* bezüglich der Parameter Boden-pH-Wert, C/N-Verhältnis und Carbonatgehalt höhere Toleranzen auf als *A. icterica*. Welcher der Faktoren bedingte, dass *A. icterica* sensibler auf den Dünger reagiert hat, kann nicht abschließend geklärt werden.

Sowohl aus den Feld- als auch aus den Laborversuchen kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass in Gärprodukten **Substanzen** enthalten sind, **die konzentrationsabhängig toxisch auf Regenwürmer wirken**. Mögliche Substanzen oder Umwelteinflüsse, die im Zusammenhang mit einer Düngung einen negativen Einfluss auf Regenwurmpopulationen haben, sind der pH-Wert oder hohe Gehalte an Salz, Schwermetallen, Ammoniak oder Benzoesäure. Der **pH-Wert** der Gärprodukte ist mit etwa 8 relativ hoch. Zwar steigt der Boden-pH-Wert selbst nicht auf so hohe Werte an, ein negativer Effekt durch direkten Kontakt der Regenwürmer mit den Gärprodukten wäre jedoch möglich. Nach KARMEGAM & DANIEL (2007) nimmt die Regenwurmabundanz mit steigenden Boden-pH-Werten ab. Nach BOUCHÉ (1972) kommt *A. icterica* auf Böden mit pH-Werten zwischen 3,9 und 8,1 vor, *A. caliginosa* toleriert etwas höhere pH-Werte bis 8,4. Ein Einfluss durch **Schwermetalle** kann ausgeschlossen werden, da GP A durch die rein pflanzlichen Substrate nur sehr geringe Schwermetallkonzentrationen aufwies (Ergebnisse nicht dargestellt). **Benzoesäure** wirkt in höheren Konzentrationen stark toxisch auf Regenwürmer (CURRY, 1976). Eine Bildung von Benzoesäure während der Fermentation von Schweinegülle wurde nachgewiesen (YASUHARA & FUWA, 1979), womit ein Vorkommen dieser Substanz in dem verwendeten Gärprodukt möglich ist. Dies wurde jedoch im Rahmen der Arbeit nicht untersucht. Als wahrscheinlich kann ein Effekt durch hohe Salzgehalte und Ammoniak

angenommen werden. Regenwürmer reagieren empfindlich auf hohe **Salzgehalte** bezüglich der Biomasse und Reproduktivität, hohe Gehalte wirken toxisch (FISCHER & MOLNÁR, 1997; OWOJORI & REINECKE, 2009; KAPLAN *et al.*, 1980). Nach WIESE & KÖNIG (2008) werden in einem intakten Gärprozess Werte für die elektrische Leitfähigkeit, welche ein Maß für den Salzgehalt ist, zwischen 15 und 25 mS cm⁻¹ gefunden. Nach BURGSTALER *et al.* (2011) steigen mit dem Mineralisierungsgrad die Salzgehalte des Fermenterinhalt an. Ein von UNTERFRAUNER *et al.* (2010) untersuchtes Gärprodukt aus der Vergärung von Mais und Schweinegülle wies eine elektrische Leitfähigkeit von 29,1 mS cm⁻¹ auf. Bei Ausbringung dieses Gärproduktes auf einen schwach gepufferten Boden stieg die elektrische Leitfähigkeit des Bodens zwei Wochen nach der Ausbringung von 0,3 auf 1,2 mS cm⁻¹ an. Auch eine Düngung mit Klärschlamm erhöhte die elektrische Leitfähigkeit im Boden in Abhängigkeit von der Aufwandmenge von 0,32 auf 0,37 bzw. 0,39 mS cm⁻¹ (BRENDHECKE *et al.*, 1993). OWOJORI & REINECKE (2009) untersuchten die Toleranzen von *A. caliginosa* sowie *E. fetida* gegenüber Salzgehalten im Boden und stellten ein Vermeidungsverhalten von über 80 % für *A. caliginosa* bei einer elektrischen Leitfähigkeit des Bodens zwischen 0,3 und 0,5 mS cm⁻¹ fest. *E. fetida* war demgegenüber mit einer Vermeidung ab Leitfähigkeitswerten zwischen 0,5 und 1,0 mS cm⁻¹ deutlich toleranter gegenüber Salzgehalten im Boden. Stellt man diese Ergebnisse gegenüber, so ist die Empfindlichkeit von Regenwürmern gegenüber hohen Salzgehalten eine Erklärung für den Rückgang der Regenwurmabundanz mit steigenden Gärprodukt-Aufwandmengen. Das GP A zeichnete sich zudem durch eine hohe Verweilzeit in der Biogasanlage aus, was wahrscheinlich hohe Salzgehalte im Gärprodukt zur Folge hat. Messungen wurden hierzu allerdings nicht durchgeführt. Einige Autoren vermuten auch, dass **Ammoniak** die festgestellten negativen Effekte bei der Ausbringung von Gülle auf Regenwürmer hervorruft (CURRY, 2004; HANSEN & ENGELSTAD, 1999). Ammoniak liegt in einem temperatur- und pH-Wert-abhängigen Gleichgewicht mit Ammonium vor. Es ist unter Normbedingungen gasförmig, somit ist die direkte Wirkung auf Regenwürmer schwierig zu testen. Ammoniakemissionen können in Abhängigkeit von der Ausbringtechnik, begünstigt durch hohe pH-Werte der Gärprodukte und hohe Temperaturen, erheblich sein. Verschiedene Untersuchungen ergaben Ammoniakemissionen nach der Ausbringung von Gärprodukten, welche zwischen 10 und 69 % des ausgebrachten NH₄⁺-N bzw. 13-18 % des applizierten N_{ges} entsprachen (WULF *et al.*, 2002; MÖLLER & STINNER, 2009; BRENNER & CLEMENS, 2005; QUAKERNACK *et al.*, 2012; GERICKE *et al.* 2007). WULF *et al.* (2002) verglichen verschiedene Applikationstechniken für Gärprodukte und fanden nach vier Tagen NH₃-N-Verluste zwischen 10 % vom ausgebrachten NH₄-N mit einem Injektionsverfahren und über 30 % bei einer Ausbringung mittels Prallteller. Die Emissionen in den ersten Stunden nach der Ausbringung machten dabei immer den größten Teil der Gesamtemission aus. Ein negativer Einfluss von Ammoniak auf Regenwürmer dürfte somit eher kurzfristig sein.

Um abschließend klären zu können, welche Substanz(en) im Gärprodukt oder welche durch Gärprodukt-Düngung auftretenden Bodenveränderungen für die toxische Wirkung auf Regenwürmer verantwortlich ist bzw. sind, müssten gezielte Vermeidungstests durchgeführt werden. Sowohl mit dem Feld- als auch mit den Vermeidungstests wurden Kurzzeiteffekte einer Gärproduktdüngung auf Regenwürmer untersucht. Um zu überprüfen, ob die negative Wirkung der Gärproduktausbringung im zeitlichen Verlauf nachlässt, wäre eine Herbstbeprobung notwendig gewesen, was im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr möglich war. Bei der Betrachtung der Ergebnisse ist auch zu beachten, dass die Regenwurmuntersuchungen nur einjährig durchgeführt wurden. Falls im Feldversuch ein positiver Effekt auf die Regenwürmer durch die Zufuhr der organischen Substanz und Nährstoffe, wie er in Vermeidungstest 1 gefunden wurde, vorhanden war, wurde dieser wahrscheinlich durch die aufgetretenen negativen Effekte überlagert.

5.2 Wirkungen der Gärproduktdüngung auf Kulturpflanzen

Bezüglich der Wirkungen der Gärprodukte auf Wachstum, Ertrag und Qualität der Kulturpflanzen ist sowohl die N-Verfügbarkeit für die Pflanzen im zeitlichen Verlauf als auch die Höhe der N-Wirkung insgesamt von Bedeutung. Darüber hinaus geben die Bilanzen der Pflanzennährelemente Hinweise darauf, ob das Nährelementverhältnis der Gärprodukte für die jeweilige Kulturpflanze günstig ist.

5.2.1 Wachstum und N-Versorgungsstatus von Silomais und Sommerweizen

Aus den Ergebnissen der Messungen von Wachstum und N-Versorgungsstatus der Kulturpflanzen werden Aussagen über die Stickstoffverfügbarkeit im zeitlichen Verlauf abgeleitet. Neben diesen Parametern können beim Sommerweizen auch die Ertragsstruktur sowie die N-Entzüge aus Stroh und Korn Hinweise darauf geben. In den durchgeführten Versuchen wurden die Dünger bei gleicher N_{ges} -Aufwandmenge verglichen. Da in den Gärprodukten im Gegensatz zu Mineraldünger ein Teil des Stickstoffs organisch gebunden und damit langsamer pflanzenverfügbar ist, konnte bezüglich ihrer Nährstoffwirkung die **Hypothese** aufgestellt werden, dass die Wachstumsförderung der Kulturpflanzen im Vergleich zu Mineraldünger länger andauert aber weniger stark ist. Voraussetzungen dafür sind optimale Wachstumsbedingungen bzw. eine stetige Mineralisierung der zugeführten organischen Substanz im Boden.

Wie zu erwarten war, wurde das **Wachstum**, gemessen an der Pflanzenhöhe und dem BFI, durch die Gärprodukte **gefördert**. Die Wirkung von Mineraldünger war in allen Versuchen und an fast allen Messterminen stärker als die der Gärprodukte. Die Blattgrünwerte der ungedüngten und der mit Gärprodukten gedüngten Pflanzen unterschieden sich hingegen kaum oder gar nicht. Die mineralisch gedüngten Pflanzen wiesen demgegenüber auch bei diesem Parameter fast durchgehend die höchsten Werte auf. Zwischen den Gärprodukten bestanden in den meisten Fällen keine signifikanten Unterschiede in der Wirkung auf das Wachstum und die

Blattfarbe, eine Reihenfolge war jedoch tendenziell erkennbar. Demnach war die Wirkung von GP A meistens stärker als die von GP C und diese wiederum stärker als die von GP B. Diese Abfolge lässt sich bis auf wenige Ausnahmen auch bei der Wirkung auf die Erträge wiederfinden (s. u.). Die unterschiedliche Wirkung der Gärprodukte korreliert mit dem Ammoniumanteil am Gesamtstickstoff in den Gärprodukten. In beiden Jahren wies GP A mit 66 und 80 % den höchsten und GP B mit 59 und 50 % den geringsten Anteil auf. Eine zunehmende Ertragswirkung mit steigenden Ammoniumgehalten bzw. abnehmenden TS-Gehalten im Gärprodukt fand auch EILER (2008) in Versuchen mit Mais.

Bezüglich des **zeitlichen Verlaufs der N-Wirkung** aus den drei Gärprodukten konnte anhand des Wachstums und der Blattgrünmessungen nur vereinzelt und in sehr geringem Maße eine länger anhaltende N-Düngewirkung gegenüber der Kontroll- oder der MD-Variante festgestellt werden. Alle gedüngten Bestände wiesen hinsichtlich des Wachstums häufig die größte Differenz zur Kontrolle bereits wenige Wochen nach der Düngung auf, welche kurz vor der Ernte tendenziell wieder abnahm. Dies deutet auf eine rasche Anfangswirkung des Stickstoffs aus den Düngern hin. In einigen Fällen nahm aber auch ausschließlich bei der MD-Variante die Differenz zu den Wachstumswerten der Kontrollvariante bis zur Ernte weiterhin zu, was den ausbleibenden Effekt des aus organischer Substanz mineralisierten Stickstoffs im späteren Verlauf der Vegetationsperiode noch verdeutlicht. In den meisten Fällen erreichten sowohl alle gedüngten Varianten als auch die Kontrollvarianten eines Versuchs ihre maximale Wuchshöhe bzw. ihren höchsten BFI in der gleichen Woche. Nur in den mit GP B gedüngten Varianten wurden die maximalen Werte im Jahr 2007 vereinzelt ein bis zwei Wochen später gemessen, was auf eine länger anhaltende Nährstoffwirkung hinweisen könnte. Allerdings veränderten sich die Werte gegenüber dem Zeitpunkt, an dem die anderen Varianten ihre maximalen Werte erreichten, nur noch geringfügig. Somit deuten die Ergebnisse der Wachstums- und Blattgrünmessungen auf eine rasche aber nicht langanhaltende Stickstoffverfügbarkeit bei allen Düngern hin. Eine Nachlieferung an Stickstoff durch Mineralisierung der organischen Substanz der Gärprodukte, wie sie zu erwarten war, konnte anhand der erfassten Parameter kaum festgestellt werden.

Mögliche Ursachen für die kaum feststellbare länger anhaltende Stickstoffverfügbarkeit nach Düngung mit Gärprodukten sind zum einen eine fehlende Mineralisierung durch äußere Bedingungen, zum anderen eine langsam ablaufende Mineralisierung durch sehr stabile organische Substanz oder aber eine schnelle Mineralisierung, so dass eine Nährstoffwirkung nicht als langanhaltender Effekt erkennbar ist. Zwar zeigen verschiedene C-Abbauversuche, dass die organische Substanz in den Gärprodukten sehr abbaustabil ist, jedoch wird Stickstoff aus organischer Substanz schneller umgesetzt als Kohlenstoff. Dies zeigen Ergebnisse von KLIMANEK & SCHULZ (1997), nach denen das C/N-Verhältnis im Boden nach Aufbringung von organischer Substanz mit dem Mineralisierungsprozess im Verlauf der Zeit weiter wird. Somit ist die N-Nährstoffwirkung aus der organischen Substanz wahrscheinlich von kürzerer Dauer als die an-

hand der Bodenatmung gemessene C-Mineralisierung, so dass ein Effekt auf die Pflanzen im Herbst nicht mehr erkennbar ist.

Die Ertragsstruktur des Sommerweizens unterschied sich in den beiden Versuchsjahren und spiegelt die Ergebnisse der Wachstums- und Blattgrünmessungen wider. Im Jahr 2006 lag die Bestandesdichte in den mit Gärprodukten gedüngten Parzellen über derjenigen der Kontrollvarianten und unter der der mineralisch gedüngten Bestände. Die Kornzahl je Ähre nahm demgegenüber nur für die Dünger GP B und C mit der Düngung zu, für GP A und MD war der Zusammenhang zur Düngung invers. Für die TKM war dies für alle Dünger der Fall, so dass die Kontrollvariante die höchsten Werte aufwies. In den Düngevarianten mit MD und GP A wurde im Verhältnis mehr Stickstoff durch Weizenstroh entzogen als durch Düngung mit GP B und C. Diese Ergebnisse weisen auf eine schnellere N-Verfügbarkeit für den MD und das GP A hin. Im Jahr 2007 unterschied sich die Ertragsstruktur vom Vorjahr: Alle drei Parameter nahmen mit steigender N-Aufwandmenge zu, mit Ausnahme der TKM beim MD und dem GP C, bei denen die mit $150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ gedüngten Varianten geringere TKM als die nur mit $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ gedüngten Varianten aufwiesen. Der N-Entzug durch Strohmasse im Verhältnis zu dem durch die Kornmasse war in diesem Jahr nur bei der MD-Variante höher, so dass die vermutete schnellere N-Anfangswirkung von MD gegenüber den Gärprodukten für dieses Jahr bestätigt werden kann.

Eine geringe TKM bei trotzdem hohen Erträgen ist ein bekanntes Phänomen (FOIS *et al.*, 2009, FREDERICK & BAUER, 1999), welches entweder bei hoher N-Gabe im Frühjahr oder bei fehlendem Stickstoff zur Kornausbildung auftreten kann. Die Ertragsstruktur des Sommerweizens zeigt somit an, dass im Jahr 2006 die Stickstoffverfügbarkeit für alle Dünger im Frühjahr noch ausreichend und später zur Kornausbildung zu gering war. Im Jahr 2007 wurde der Stickstoff erst nach der Bestockung wirksam. Der zeitliche Verlauf der N-Wirkung sowohl aus den Gärprodukten als auch des Mineraldüngers kann sehr gut mit der vorherrschenden Witterung in den beiden Versuchsjahren erklärt werden. Zur Förderung der Mineralisierung des organisch gebundenen Stickstoffs aus den Gärprodukten sind eine hohe Bodenfeuchte sowie hohe Temperaturen vorteilhaft. Zur Auflösung der Nährstoffgranulate des Kalkammonsalpeters bedarf es ebenfalls ausreichender Feuchtigkeit und Wärme im Boden, da die Nährstoffe bei Trockenheit und Kälte nur langsam in den Boden gelangen (FUJINUMA *et al.*, 2009). Im Jahr 2006 mineralisierte der Stickstoff aus den Gärprodukten durch das feuchte Frühjahr schnell und war damit verfügbar, auch die Mineraldüngergranulate lösten sich rasch auf. Dies bewirkte eine hohe Bestandesdichte im Sommerweizen und hohe Wachstumsraten. An der hohen Anzahl ährentragender Halme entwickelten sich aufgrund ausbleibender späterer N-Gaben bzw. nicht ausreichender Mineralisierungsraten des organisch gebundenen Stickstoffs nur wenige Körner je Ähre mit einer geringen TKM. Im Jahr 2007 setzte demgegenüber das gesamte Pflanzenwachstum aufgrund von Wassermangel im Frühjahr erst später ein, so dass für spätere Entwicklungs-

schritte und für die Ausbildung von nur wenigen ährentragenden Halmen noch ausreichend Stickstoff verfügbar war. Der geringe Feldaufgang konnte durch den Weizenbestand bis zur Ernte kaum kompensiert werden, so dass der zugeführte Stickstoff nicht vollständig durch die Pflanzen aufgenommen wurde. Einen Hinweis darauf geben die leicht aber nicht signifikant erhöhten N_{\min} -Werte im Herbst auf diesem Schlag.

5.2.2 Erträge und Qualität der Ernteprodukte

Im engen Zusammenhang mit dem Wachstum, der Entwicklung und der Ertragsstruktur der Pflanzen stehen die **Erträge sowie die äußere und innere Qualität der Ernteprodukte**. Auch hier ist die Wirkung der Gärprodukte nicht nur von der chemischen Zusammensetzung der Düngestoffe abhängig, sondern auch von der Witterung, der Boden- und Fruchtart sowie dem Ausbringungszeitpunkt. Für die Gärprodukte konnte unter den Voraussetzungen von ausreichend Wasser und Wärme aufgrund ihrer günstigen Zusammensetzung der wichtigsten Pflanzennährelemente mit einer positiven Wirkung auf den Ertrag der Kulturpflanzen gerechnet werden. Die Höhe der Ertragssteigerung ist dabei im konkreten Fall nicht vorhersehbar, da die Witterung bei Feldversuchen einen großen Einfluss hat. Die hohen Ammoniumanteile von bis zu 80 % am Gesamtstickstoff lassen, durch den Vergleich mit Schweinegülle, MDÄ von etwa 60 % erwarten.

Die Düngung mit Gärprodukten führte in den Parzellenfeldversuchen immer, in den Praxisversuchen nur an einem der beiden Standorte zu einer Ertragssteigerung. Mit einer N-Aufwandmenge von 150 kg ha^{-1} wurde im Parzellenfeldversuch mit Sommerweizen, außer durch das GP B im Jahr 2006, immer eine signifikante Ertragssteigerung erreicht. Im Versuch mit Silomais waren demgegenüber nur die durch das GP A im Jahr 2006 bzw. die GP A und C im Jahr 2007 erzielten Erträge signifikant höher als in den Kontrollvarianten. In der Regel wurde mit höheren N-Aufwandmengen auch ein höherer Ertrag erreicht. In fast allen Versuchen waren die Ertragswirkungen deutlich geringer als erwartet. So wurden im Jahr 2007 mit N-MDÄ zwischen 33 und 59 % für Sommerweizen und zwischen 2 und 36 % für Silomais (berechnet nach Methode 2, vgl. Tabelle 4-6 und Tabelle 4-7) häufig nicht einmal 50 % der Düngewirkung der Mineraldüngervariante erreicht. Im Versuchsjahr 2006 wurden die Gärprodukte etwas ertragswirksamer als im Folgejahr. Besonders niedrig war die Wirkung der Gärprodukte auf die Maiserträge im Jahr 2007. Im Vergleich der beiden Kulturarten war die N-Ausnutzung für Sommerweizen deutlich höher als für Silomais. Das GP B wies fast durchgehend die geringsten Wirksamkeits-Kennziffern auf. Es wurden dennoch immer Ertragssteigerungen erzielt, was in den Praxisversuchen für dieses Gärprodukt nicht der Fall war. Im Jahr 2006 führte eine zunehmende N-Aufwandmenge zu sinkenden Silomaiserträgen, im Jahr 2007 erzielte nur die höchste Aufwandmenge eine Ertragsverringerung gegenüber der Kontrollvariante. Die Ertragsunterschiede waren in beiden Jahren nicht signifikant, was wahrscheinlich u. a. durch die Anordnung

der Parzellen im Praxisversuch bedingt war. Da das Ergebnis aber in beiden Versuchsjahren auf zwei unterschiedlichen Flächen in Püggen negativ ausfiel, ist die Wahrscheinlichkeit eines zufälligen Gradienten im Boden relativ gering.

In der Literatur wird fast ausschließlich von positiven Ertragswirkungen von Gärprodukten berichtet (u. a. SVENSSON *et al.*, 2004; TERHOEVEN-URSELMANS *et al.*, 2009; GARG *et al.*, 2005; BRENNER, 2008; EILER, 2008; LORIA *et al.*, 2007; PÖTSCH, 2004; QUAKERNACK *et al.*, 2012), wie sie in den Parzellenfeldversuchen sowie im Praxisversuch am Standort Dolgeln im Rahmen dieser Arbeit auch festgestellt wurden.

Wie bereits bei den Wachstumsparametern festgestellt wurde, korreliert die Wirkung der Gärprodukte auf die Erträge im Anwendungsjahr mit ihrem Ammoniumanteil am Gesamtstickstoff. Neben der chemischen Zusammensetzung der Düngestoffe spielt aber auch die N-Ausnutzungseffizienz der Kulturarten eine Rolle. Eine bessere N-Wirkung aus organischen Düngern von Getreide gegenüber Mais wird in der Literatur nicht gefunden. EILER (2007) ermittelte eine bessere N-Ausnutzung aus Gärprodukten durch Mais gegenüber Weizen und erklärte dieses Ergebnis damit, dass der spät mineralisierende organisch gebundene Stickstoff durch den Mais besser ausgenutzt werden kann. Demgegenüber argumentieren SVENSSON *et al.* (2004) bezogen auf die bessere N-Ausnutzung durch Gerste gegenüber Hafer, dass durch den hohen Ammoniumanteil der Gärprodukte diese für eine Düngung in Kulturarten mit einer kurzen und intensiven N-Aufnahmephase besser geeignet seien. Eine mögliche Begründung für die geringere N-Ausnutzung durch Silomais in den durchgeführten Versuchen sind gasförmige N-Verluste bei der Ausbringung, da die Temperaturen bei der Ausbringung für den Silomais in beiden Jahren höher waren als beim Sommerweizen (s. Tabelle 3-3).

Da die relativen Erträge meist unter 50 % der Mineraldüngervariante lagen, obwohl die Ammoniumgehalte in den Gärprodukten zwischen 50 und 80 % des Gesamtstickstoffs ausmachten, ist der ausgebrachte Stickstoff offensichtlich nicht optimal ertragswirksam geworden. Mögliche Gründe für eine geringe Stickstoffwirkung im Anwendungsjahr sind

- gasförmige N-Verluste in Form von $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{N}_2\text{O-N}$ oder N_2 ,
- ein geringer Mineralisierungsgrad des organisch gebundenen Stickstoffs im Boden,
- eine N-Auswaschung nach Umwandlung des Ammoniums in Nitrat sowie
- eine N-Festlegung an Sorptionskomplexe, insbesondere bei tonigen Böden oder durch Mikroorganismen.

Der Ammoniakemission bei der Ausbringung ist hier die größte Bedeutung beizumessen, da die Gefahr für Gärprodukte aufgrund des hohen pH-Wertes in Verbindung mit dem hohen Ammoniumgehalt besonders hoch ist. Die Verluste können zwischen 10 und 69 % des ausgebrachten $\text{NH}_4^+\text{-N}$ bzw. 13-18 % des N_{ges} betragen (WULF *et al.*, 2002; MÖLLER & STINNER, 2009; BRENNER & CLEMENS, 2005; QUAKERNACK *et al.*, 2012; GERICKE *et al.* 2007). Dabei machen die Verluste in den ersten Stunden nach der Ausbringung den größten Teil aus. Häufig wurde ein Zusam-

menhang zwischen TS-Gehalt und NH_3 -Emissionen gefunden, da eine rasche Infiltration infolge geringer TS-Gehalte der Düngestoffe die Ausgasungen vermindern (FRICK *et al.*, 1996; WULF *et al.*, 2002; BRENNER & CLEMENS, 2005; QUAKERNACK *et al.*, 2012). Die beiden in der vorliegenden Arbeit genutzten Gärprodukte aus reiner Energiepflanzenvergärung (GP A und B) wiesen höhere TS-Gehalte als GP C auf. Bei GP B war der TS-Gehalt mit 8,4 % im Jahr 2007 besonders hoch. Allerdings ist der Unterschied zu GP A mit 7,0 % TS nicht so groß, als dass dies allein die schlechtere Düngewirkung von GP B erklären könnte. Die Ammoniakemissionen werden des Weiteren begünstigt durch hohe Temperaturen, geringe Luftfeuchte und hohe Windgeschwindigkeiten bei der Ausbringung. Die aus der Strahlungsbilanz berechnete potenzielle Verdunstung war mit 6,7 mm am Tag der Nachdüngung im Sommerweizen 2006 sowie an den beiden Ausbringungsterminen im Mais mit 4,4 und 4,1 mm relativ hoch. Günstige Witterungsverhältnisse wiesen demgegenüber die Termine der ersten Gärprodukt-Ausbringung im Weizen 2006 sowie der Ausbringungstermin 2007 auf.

Berichte über negative Wirkungen von Gärprodukten auf Erträge, wie sie am Praxisversuchstandort Püggen gefunden wurden, werden in der Literatur nicht gefunden. Teilweise keine Düngewirkung von Gärprodukten wurde von KAUTZ & RAUBER (2007) festgestellt. In den von ihnen durchgeführten Versuchen wurde in einem Versuchsjahr eines von zwei Gärprodukten nicht ertragswirksam. Die Düngung mit GP B wirkte sich nur am Standort Püggen und nicht in Berlin-Dahlem negativ auf die Silomaiserträge aus. Dies kann entweder durch den Standort oder durch den Ausbringungszeitpunkt bedingt sein. Da die Bodenarten an beiden Standorten mit einem schwach lehmigen Sand in Dahlem und einem mittel schluffigen Sand in Püggen ähnlich sind und sich die Witterung auch nicht deutlich unterschieden hat, spielen wahrscheinlich bodenchemische Eigenschaften eine Rolle. Das auffälligste Merkmal des Bodens am Standort Püggen war der geringe pH-Wert von 4,7 zu Versuchsbeginn. Der pH-Wert am Standort Dahlem war mit einem Startwert von 6,8 vergleichsweise hoch. Über negative Auswirkungen des Einsatzes von Gärprodukten auf bodenchemische und -physikalische Merkmale insbesondere bei schwach gepufferten Böden berichten UNTERFRAUNER *et al.* (2010). Die Autoren stellten einen kurzfristigen pH-Wert-Anstieg direkt nach der Ausbringung des Gärproduktes mit einer anschließenden Bodenversauerung fest. Sie begründeten dies mit dem hohen Kaliumgehalt in den Gärprodukten, durch welche der K-Anteil an der Kationenaustauschkapazität ansteigt und H^+ -Ionen am Sorptionskomplex verdrängt und in die Bodenlösung entlassen werden. Eine weitere pH-Absenkung im Boden in den hochgedüngten Parzellen wäre eine mögliche Erklärung für die negative Ertragswirkung am Standort Püggen. Bezüglich der Ausbringungszeitpunkte ist es außerdem möglich, dass die beiden Gärprodukt-Gaben am Standort Püggen, welche direkt in den Bestand erfolgten, Verätzungen an den Pflanzen oder Pflanzenwurzeln bewirkten. Anschließende Trockenheit könnte den Effekt noch verstärkt haben. In Tests zur Phytotoxizität von Gärprodukten aus der Vergärung von Rinder- und Schweinegülle mit verschiedenen

Kofermenten stellten ALBURQUERQUE *et al.* (2012) eine Reduktion des Biomassezuwachses an Kresse- und Salatkeimlingen fest, wenn die jungen Pflanzen mit hohen Konzentrationen der Gärprodukte in Berührung kamen. Geringe Konzentrationen förderten demgegenüber den Biomassezuwachs im Vergleich zu einer unbehandelten Kontrolle. Sie erklärten diese Wirkung u. a. mit hohen Salzgehalten in den Gärprodukten. Was den Ertragsrückgang am Standort Püggen bewirkt hat, kann nicht endgültig geklärt werden.

Die Wirkungen der Gärprodukte auf **Qualitätsparameter** wurden anhand der Größenverteilung sowie des Rohproteingehaltes des Sommerweizenkorns untersucht. Dabei ist die Korngröße ein Parameter für die Mahlfähigkeit und der Proteingehalt ein Qualitätskriterium für die Backfähigkeit des Weizens, da er mit dem Klebergehalt korreliert ist (KÜBLER, 1994). Sowohl die Kornausbildung als auch der Rohproteingehalt des Weizenkorns werden durch eine späte N-Gabe, welche in den durchgeführten Versuchen nicht verabreicht wurde, gefördert.

Die **Korngröße** veränderte sich im Jahr 2006 durch die Düngung dahingehend, dass der Anteil kleiner Körner zunahm. Im Jahr 2007 war der Anteil großer Weizenkörner nach Gärprodukt-Düngung höher als bei der Kontrollvariante, die Düngung mit MD verringerte demgegenüber diesen Anteil. Wie bereits bei der TKM, können diese Ergebnisse sehr gut mit der Witterung und der damit verbundenen Mineralisierung der organisch gebundenen Nährstoffe erklärt werden. Die positiven Bedingungen für die Stickstoffmineralisierung im Frühjahr 2006 bewirkten wahrscheinlich, dass durch die gute Ausbildung des Bestandes zu Beginn der Vegetationsperiode später zur Kornfüllungsphase Stickstoff fehlte. Im Jahr 2007 waren demgegenüber die Bedingungen für die Mineralisierung im Frühjahr schlecht. Erst einige Wochen später waren die Bedingungen durch einsetzende Niederschläge besser, so dass insbesondere bei den Gärprodukt-Varianten ausreichend Nährstoffe für eine gute Kornausbildung vorhanden waren.

Der **Rohproteingehalt** ist nach KÜBLER (1994) in der Regel negativ mit dem Ertrag korreliert. Dies war in den durchgeführten Versuchen nicht der Fall: Bei der MD-Variante war die Korrelation in beiden Versuchsjahren positiv und bei den Gärprodukten gab es keinen eindeutigen Zusammenhang. Nach FEIL & BÄNZIGER (1999) verschwindet der inverse Zusammenhang möglicherweise mit sehr hohen N-Gaben, da dann die N-Aufnahme nicht mehr durch mangelnde N-Verfügbarkeit begrenzt ist. Der Rohproteingehalt des Weizenkorns wird maßgeblich durch die Gesamtstickstoffversorgung beeinflusst und kann durch eine qualitätsbetonte N-Spätdüngung erhöht werden. Umgekehrt kann aber nicht aus einem hohen Rohproteingehalt im Korn auf die N-Verfügbarkeit im Boden zur Zeit der Kornfüllungsphase geschlossen werden, da 70-90 % des Stickstoffs bereits im Verlauf des Längenwachstums durch die Weizenpflanzen aufgenommen werden (FREDERICK & BAUER, 1999) und da während der Pflanzenentwicklung ständig Umlagerungsprozesse des Stickstoffs stattfinden (KÜBLER, 1994). Während des Reifeverlaufs des Korns finden ein Eiweißabbau sowie ein Stärkeaufbau statt, wodurch deren Gehalte durch die Dauer der Abreife mitbestimmt werden. Diese Umstände machen eine Interpretation der Ergeb-

nisse bzw. eine Beurteilung der Düngewirkung sehr schwierig. Insgesamt scheint aber die Witterung einen stärkeren Einfluss auf Qualitätsparameter zu haben als die Art der N-Düngung.

5.2.3 Nährstoffbilanzen

Sowohl die Nährstoffzusammensetzung der Gärprodukte als auch der Nährstoffbedarf der Pflanzen können sehr stark schwanken. Anhand der berechneten Nährstoffbilanzen kann abgelesen werden, ob die Zusammensetzung der Nährstoffe in den Gärprodukten für die jeweilige Kulturpflanze im untersuchten Jahr günstig war oder nicht. Die GP A und B hatten als gemeinsamen Nenner die ausschließliche Nutzung von Energiepflanzen als Substrate, das GP C stammt demgegenüber aus der Vergärung von Energiepflanzen mit Gülle. Somit konnte mit einer ähnlichen **Nährstoffzusammensetzung** für die GP A und B gerechnet werden. Im Vergleich zu den in Kapitel 2.3.1 dargestellten Studien hatten die beiden Gärprodukte aus reiner Energiepflanzenvergärung relativ hohe TS-Gehalte. Für das GP A war des Weiteren der oTS-Gehalt, der N_{ges} - sowie der NH_4^+ -N-Gehalt höher als die Mittelwerte aus den Studien (vgl. Tabelle 2-1 und Tabelle 3-5). Alle anderen Werte stimmten mit denen aus der Literaturübersicht überein. Bezüglich der Nährstoffzusammensetzung glichen sich die GP A und B weniger. Einen größeren Unterschied wies das GP A gegenüber den anderen beiden Gärprodukten auf, da es im Verhältnis weniger Kalium bzw. mehr Stickstoff und Phosphor enthielt. Möglicherweise war beim GP B der K-Gehalt durch den Einsatz von Kartoffeln als Substrat etwas höher.

Mais hat einen hohen **Bedarf** an Kalium und Phosphor, letzteres insbesondere in der Jugendentwicklung. Beim Weizen ist der N-Bedarf hoch und eine gute zeitliche Verteilung über die verschiedenen Entwicklungsstadien von besonderer Bedeutung für die Qualitätsausbildung. Die Verfügbarkeiten der Nährstoffe bzw. ihre Aufnahme durch die Pflanzen sind aber u. a. von der Witterung abhängig und können dadurch nicht prognostiziert werden.

Beim Sommerweizen war im ersten Versuchsjahr die Kaliumbilanz bei einer Aufwandmenge von ca. 150 kg ha^{-1} N nur für das GP B noch positiv, der Gehalt in den anderen beiden Gärprodukten war für den hohen Bedarf in diesem Jahr nicht ausreichend. Nach der Örettichernte waren für das GP C die Bilanzen aller drei Nährelemente negativ. Die Phosphorbilanzen der GP A und B waren nach der Örettichernte nahezu ausgeglichen, die N-Bilanzen noch positiv. Im zweiten Jahr waren durch die geringen Erträge infolge der Frühjahrstrockenheit die N-, P- und K-Bilanzen aller drei N-Aufwandmengen positiv. Die Varianten mit den GP B und C wiesen höhere K-Überschüsse auf, da durch das trockene Frühjahr wenig kaliumreiche Strohmasse produziert wurde.

In den Maisversuchen war im ersten Versuchsjahr bei einer N-Aufwandmenge von ca. 150 kg ha^{-1} die K-Bilanz ebenfalls nur für das GP B positiv. Die GP A und B wiesen mit rund -60 kg negative Bilanzen auf. Die Stickstoffbilanzen waren mit ca. $30\text{-}50 \text{ kg}$ für alle drei Gärprodukte positiv, die Phosphorbilanz war leicht negativ bis nahezu ausgeglichen. Ganz anders als

beim Sommerweizen waren für Silomais im zweiten Versuchsjahr bedingt durch die hohen Erträge nahezu die gesamten Nährstoffbilanzen aller drei N-Aufwandmengen negativ. Da in den Gärprodukt-Varianten mit steigender N-Aufwandmenge die Erträge nur geringfügig zunahmen, waren die Bilanzen der Nährelemente in den mit $50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ gedüngten Varianten deutlich stärker negativ als in den mit $150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ gedüngten Varianten, die insbesondere für das Nährelement Stickstoff nahezu ausgeglichen waren. Ausnahmen waren auch hier die K-Bilanzen für die GP A und C, die stärker negativ waren als für das GP B.

Zusammenfassend sind die Nährstoffbilanzen stark von der Witterung abhängig, da diese das Ertragsniveau beeinflusst. Ein wiederkehrendes Muster waren die negativen Kaliumbilanzen für die GP A und C bei beiden Kulturarten. Für Silomais gab es bei einer ausgeglichenen Stickstoffbilanz in den meisten Fällen einen deutlichen Mangel an Phosphor und Kalium.

Hinweise hinsichtlich zu geringer Kaliumgehalte können in der Literatur nicht gefunden werden. Im Gegensatz dazu bewerten UNTERFRAUNER *et al.* (2010) die hohe Löslichkeit des Kaliums in den Gärprodukten als kritisch, da die Wirkung wie bei einem Kalium-Flüssigdünger sei und die Bodenfruchtbarkeit durch die Überlagerung von Sorptionskomplexen negativ beeinflusst werde. In Versuchen von SVENSSON *et al.* (2004) mit Gerste und Hafer war der Phosphorgehalt in den Gärprodukten wie in den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Mais-Versuchen ebenfalls zu gering und es wurde empfohlen, diesen mineralisch auszugleichen. Die besten Ertragsergebnisse wurden in diesen Versuchen bei einer Mischung von organischen mit mineralischen Düngern erbracht.

6 FAZIT

Als Ergebnis der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten zweijährigen Feldversuche kann die Verwendung von Gärprodukten aus der Biogaserzeugung als Dünger im Pflanzenbau als positiv bewertet und empfohlen werden.

Die Feldversuche an den Standorten Berlin und Dolgeln haben gezeigt, dass das Pflanzenwachstum von Sommerweizen, Silomais und Roggen durch die Ausbringung von Gärprodukten gefördert und die Erträge gesteigert werden können. Die Wirkung blieb in den meisten Fällen jedoch hinter der des N-Mineraldüngers zurück. So lag der relative Ertrag der Gärproduktvarianten nach Abzug der Erträge der Kontrollvarianten je nach Jahr, Gärprodukt und Kultur in den Parzellenfeldversuchen bei 11-84 % der jeweiligen Mineraldüngervariante. Daraus lässt sich näherungsweise die einzusparende Menge an N-Mineraldünger ableiten. Die Erwartungen an die N-Wirkung der Gärprodukte lagen aufgrund der hohen Ammoniumgehalte dieser Dünger zum Teil deutlich über den erzielten Ergebnissen. Die Düngewirkung der Gärprodukte nahm dennoch mit steigendem Ammoniumanteil am Gesamtstickstoff zu. Bei Sommerweizen war sie deutlich höher als bei Mais. Um fundierte Aussagen über die genaue Düngewirkung von Gärprodukten machen zu können bzw. Mineraldüngeräquivalente ableiten zu können, sind Untersuchungen in langjährigen Dauerfeldversuchen, wie sie vor vielen Jahren auch für Stallmist und andere Wirtschaftsdünger angelegt wurden, notwendig. Auch die Ermittlung der Anrechenbarkeit des organisch gebundenen Stickstoffs im Anwendungsjahr bzw. für die Folgejahre ist nur über die Betrachtung mehrerer Jahre, Standorte und verschiedenster Gärprodukte abzuleiten.

Einen ebenfalls positiven Effekt hatte die Ausbringung von Gärprodukten auf die Bodenatmung, welche für wenige Tage intensiv erhöht war. Eine etwas erhöhte Bodenatmung gegenüber den Kontrollvarianten wurde noch für einige Wochen nach der Ausbringung gemessen. Da die CO₂-Exhalation aber auch durch die Ausbringung von Mineraldünger zunahm, wurde dieser Effekt nicht durch die organische Substanz des Düngers hervorgerufen, sondern durch die Zufuhr von Nährstoffen für Pflanzen und Bodenlebewesen. Die Ergebnisse der Bodenatmungsmessungen zeigten zum einen, dass Gärprodukte keine die Bodenmikroorganismen hemmenden Substanzen enthalten sondern bei Ausbringung in einem Jahr bzw. in zwei aufeinander folgenden Jahren die mikrobielle Aktivität im Boden fördern. Zum anderen geben sie Hinweise darauf, dass die leicht verfügbare organische Substanz in den Gärprodukten sehr schnell umgesetzt wird und die danach verbleibenden kohlenstoffhaltigen Verbindungen relativ stabil sein müssen. Somit werden durch den C-abbauenden Vergärungsprozess mit der Gärproduktausbringung zwar nur wenige Kohlenstoffverbindungen in den Boden gebracht, diese sind aber besonders abbaustabil und tragen deshalb zur Humusreproduktion bei.

Bei den bodenchemischen Parametern konnten nur wenige Veränderungen durch die Ausbringung von Gärprodukten in den beiden Versuchsjahren bestimmt werden. Zur Abschätzung längerfristiger Auswirkungen sind Dauerfeldversuche erforderlich.

Bei der Untersuchung der Wirkung von Gärprodukten auf die Bodenmakrofauna ergaben die Feld- und Laborversuche unterschiedliche Ergebnisse. So kann nach den Ergebnissen der Feldversuche nicht ausgeschlossen werden, dass hohe Aufwandmengen von Gärprodukten zu einer Reduktion der Regenwurmabundanz im Feld führen. Als mögliche Substanzen, die eine zumindest kurzfristig negative Wirkung auf Regenwürmer haben können, wurden Ammoniak und Benzoesäure sowie hohe Salzgehalte diskutiert. In den Laborversuchen konnten hingegen bei Aufbringung gemäßigter Aufwandmengen keine negativen Wirkungen von Gärprodukten auf die Kompostwurmart *Eisenia fetida* festgestellt werden.

Somit können die zu Beginn der Arbeit (Kap. 1.3) gestellten Hypothesen, dass

- Gärprodukte aus der Mono- und Kofermentation von Energiepflanzen keine negativen Effekte auf den Boden haben und die mikrobielle Aktivität sowie die Bodenmakrofauna fördern und
- der Einsatz von Gärprodukten als Dünger einen positiven Effekt auf das Wachstum, die Entwicklung, die Erträge und die Qualität der Ernteprodukte von Kulturpflanzen hat, der jedoch bei gleicher N-Aufwandmenge geringer als der von Mineraldünger ist,

weitestgehend bestätigt werden. Die landwirtschaftliche Nutzung von Gärprodukten kann folglich einen wertvollen Beitrag zur Rückführung von Nährstoffen in den Stoffkreislauf leisten. Durch die Einsparung von Mineraldünger können darüber hinaus sowohl ökologische als auch ökonomische Vorteile gewonnen werden.

7 ANWENDUNGSEMPFEHLUNGEN

Gärprodukte zeichnen sich gegenüber anderen Wirtschaftsdüngern besonders durch einen vergleichsweise hohen Anteil an Ammoniumstickstoff am Gesamtstickstoff aus. Aufgrund der ebenfalls erhöhten pH-Werte können relevante Stickstoffverluste auftreten, so dass sich besondere Anforderungen an die Lagerung und Ausbringung von Gärprodukten ergeben. Zur Reduzierung von Ausbringungsverlusten sollte z. B. auf eine möglichst bodennahe Ausbringung und eine sofortige Einarbeitung in den Boden geachtet werden.

Für Kulturen mit langanhaltender Vegetationsperiode wie z. B. Silomais ist eine Ergänzung von Gärprodukten mit N-Mineraldünger zu empfehlen, um den späten N-Bedarf der Kultur abzudecken. Dies gilt insbesondere für Gärprodukte mit einem sehr hohen Ammoniumgehalt und einem geringeren organisch gebundenen Stickstoffanteil.

Zur Anrechenbarkeit des Stickstoffs aus Gärprodukten für die Aufwandmengenberechnung fehlen bisher aus Dauerfeldversuchen abgeleitete Werte. Solange solche nicht verfügbar sind, muss auf die Ergebnisse bisheriger Untersuchungen sowie theoretischer Ableitungen zurückgegriffen werden. Eine Empfehlung zur Stickstoffanrechenbarkeit gibt die Bundesgütegemeinschaft Kompost für die gütegesicherten Gärprodukte im Prüfzeugnis. Hiernach sollten im ersten Anwendungsjahr der anorganische Stickstoff plus 5 % des organisch gebundenen Stickstoffs bei der Berechnung der Aufwandmengen berücksichtigt werden. Bei langjähriger Anwendung wird demgegenüber eine Anrechnung von 25 % des organisch gebundenen Stickstoffs empfohlen (BUNDESGÜTEGEMEINSCHAFT KOMPOST, 2010). Eine 100%ige Anrechnung des anorganischen Stickstoffs aus den Gärprodukten setzt allerdings eine verlustarme Lagerung und Ausbringung voraus.

Sowohl die Nährstoffzusammensetzung von Gärprodukten als auch der Nährstoffbedarf verschiedener Kulturpflanzen können in weiten Grenzen schwanken. Um längerfristig die Anreicherung einzelner Nährelemente im Boden und damit schädliche Umwelteinwirkungen zu vermeiden, sollte die Düngerberechnung anhand desjenigen Nährstoffes erfolgen, der zuerst sein Optimum erreicht. In den durchgeführten Versuchen mit Silomais war z. B. Stickstoff das Nährelement, welches zuerst das Optimum erreichte. Phosphor und Kalium hätten in diesem Fall entsprechend mit Mineraldünger ausgeglichen werden müssen, um eine optimale Nährstoffversorgung der Pflanze zu erreichen. Da sich die Nährstoffzusammensetzung von Gärprodukten auch über die Zeit verändern kann, sollten regelmäßig Analysen durchgeführt werden, insbesondere nach Änderung der Substratzusammensetzung für die Biogasproduktion. Dies gehört, wie die Einbeziehung von N_{\min} -Werten des Bodens in Düngeraufwandberechnungen, zur guten fachlichen Praxis bei der Anwendung von Wirtschaftsdüngern.

LITERATURVERZEICHNIS

- Ad-hoc-AG Boden: Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. Auflage. Hannover: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung Stuttgart 2005, 438 Seiten.
- Alburquerque, J.A.; de la Fuente, C.; Ferrer-Costa, A.; Carrasco, L.; Cegarra, J.; Abad, M.; Bernal, M.P. (2012): Assessment of the fertilizer potential of digestates from farm and agroindustrial residues. *Biomass and Bioenergy* 40, 181-189.
- Asmus, F.; Linke, B. (1987): Zur pflanzenbaulichen Verwertung von Gülle-Faulschlamm aus der Biogasgewinnung. *Feldwirtschaft* 28 (8), 354-355.
- Asmus, F.; Linke, B.; Dunkel, H. (1988): Eigenschaften und Düngewirkung von ausgefaulter Gülle aus der Biogasgewinnung. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* 32 (8), 527-532.
- Beck, T. (1983): Die N-Mineralisierung von Böden im Laborversuch. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 146, 243-252.
- Beer, V.; Suntheim, L.: Untersuchungen zur Düngewirkung von Gülle unterschiedlicher Herkunft vor und nach der Behandlung in Biogasanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Phosphors. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.). Dresden: Sächsisches Digitaldruck Zentrum GmbH 2003, 72 Seiten.
- Bermejo, G.; Krück, S.; Ellmer, F. (2010): Einfluss von Gärprodukten aus der Biogaserzeugung auf die Regenwurmpopulationen eines sandigen Standortes. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften* 22, 211-212.
- Bernal, M.P.; Kirchmann, H. (1992): Carbon and nitrogen mineralization and ammonia volatilization from fresh, aerobically and anaerobically treated pig manure during incubation with soil. *Biology and Fertility of Soils* 13, 135-141.
- Bernier, N. (1998): Earthworm feeding activity and development of the humus profile. *Biology and Fertility of Soils* 26, 215-223.
- Besford, R.T. (1979): Phosphorus nutrition and acid phosphatase activity in the leaves of seven plant species. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 30 (3), 281-285.
- Bischofsberger, W.; Dichtl, N.; Rosenwinkel, K.-H.; Seyfried, C.F.; Böhnke, B.: Anaerobtechnik. 2. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag 2005, 718 Seiten.
- BMWi & BMU (2007): Bericht zur Umsetzung der in der Kabinettsklausur am 23./24.08.2007 in Meseberg beschlossenen Eckpunkte für ein integriertes Energie- und Klimaprogramm. Online: http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/gesamtbericht_iekp.pdf (18.06.2010).
- Bouché, M.B.: Lombriciens de France: Écologie et Systématique. Paris: Institut National De La Recherche Agronomique 1972, 671 Seiten.

- Brauckmann, H.-J.; Broll, G. (2007): Auswirkungen von Gärresten aus Biogasanlagen auf Regenwürmer. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* 110 (2), 747-748.
- Brendecke, J.W.; Axelson, R.D.; Pepper, I.A. (1993): Soil microbial activity as an indicator of soil fertility: long-term effects of municipal sewage sludge on an arid soil. *Soil Biology and Biochemistry* 25 (6), 751-758.
- Brenner, A. (2008): Untersuchungen zur Düngewirkung von Gärrückständen unter besonderer Berücksichtigung von NH_3 - und NO_3^- -Verlusten. Dissertation an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn, 131 Seiten. Online: <http://hss.ulb.uni-bonn.de/2009/1757/1757.pdf> (12.06.2011).
- Brenner, A.; Clemens, J. (2005): Vergleich der Stoffflüsse mit ökologischer Bilanzierung von zwei Kofermentationsanlagen. Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunkt „Umweltverträgliche und Standortgerechte Landwirtschaft“ 128. Landwirtschaftliche Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn (Hrsg.), 90 Seiten. Online: <http://www.usl.uni-bonn.de/pdf/Forschungsbericht%20128.pdf> (30.08.2012).
- Brunner, E. (1999): SAS-Standardprozeduren zur nichtparametrischen Datenanalyse. Tutorium. Bundesgütegemeinschaft Kompost (2010): RAL-Prüfzeugnis. Online unter: http://www.kompost.de/fileadmin/docs/guetesicherung/Pruefzeugnis_NWGP.pdf (20.09.2012).
- Burgstaler, J.; Wiedow, D.; Godlinski, F.; Kanswohl, N. (2011): Verminderung des Restgaspotentials und gasförmiger Emissionen aus Gärresten der Biogasproduktion. *Landbauforschung – vTI Agriculture and Forestry Research* 2 (61), 127-140.
- Cisse, L.; Mrabet, T. (2004): World Phosphate Production: Overview and Prospects. *Phosphorous Research Bulletin* 15, 21-25.
- Cotton, D.C.F.; Curry, J.P. (1980): The response of earthworm populations (Oligochaeta, Lumbricidae) to high applications of pig slurry. *Pedobiologia* 20, 189-196.
- Curry, J.P. (1976): Some effects of animal manures on earthworms in grassland. *Pedobiologia* 16, 425-438.
- Curry, J.P.: Factors Affecting the Abundance of Earthworms in Soils. In: *Earthworm Ecology*. Edwards, C.A. (Hrsg.), 2. Auflage. Boca Raton Florida: CRC Press 2004, 91-114.
- Curry, J.P.; Schmidt, O. (2007): The feeding ecology of earthworms – a review. *Pedobiologia* 50, 463-477.
- Dalenberg, J.W.; Jager, G. (1989): Priming effect of some organic additions to ^{14}C -labelled soil. *Soil Biology and Biochemistry* 21, 443-448.
- Davidson, E.A.; Belk, E.; Boone, R.D. (1998): Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Global Change Biology* 4 (2), 217-227.

- Delogu, G.; Cattivelli, L.; Pecchoni, N.; De Falcis, D.; Maggiore, T.; Stanca, A.M. (1998): Uptake and agronomic efficiency of nitrogen in winter barley and winter wheat. *European Journal of Agronomy* 9, 11-20.
- De Neve, S.; Sleutel, S.; Hofman, G. (2003): Carbon mineralization from composts and food industry wastes added to soil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 67, 13-20.
- Denman, K.L.; Brasseur, G.; Chidthaisong, A.; Ciais, P.; Cox, P.M.; Dickinson, R.E.; Hauglustaine, D.; Heinze, C.; Holland, E.; Jacob, D.; Lohmann, U.; Ramachandran, S.; da Silva Dias, P.L.; Wofsy, S.C.; Zhang, X.: Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z.; Marquis, M.; Averyt, K.B.; Tignor, M.; Miller, H.L (Hrsg.). Cambridge, United Kindgdom and New York, USA: Cambridge University Press 2007, 499-587.
- Dennert, J. (2007): N-Spätdüngung in Winterweizen, um das Ertragspotenzial auszuschöpfen und die geforderte Qualität zu erreichen; Optimierung von Termin und Menge. Online: http://www.wzw.tum.de/pbpz/pdf/ND_sp_07.pdf (12.06.2011).
- DESTATIS (2012): Klärschlammentsorgung aus der biologischen Abwasserbehandlung 2010. Online unter: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/Tabellen/KlaerschlammmVerwertArt2010.html>
- Diepenbrock, W.; Ellmer, F.; Léon, J.: *Ackerbau, Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung*. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer 2005, 366 Seiten.
- Döhler, H.; Wulf, S.; Grebe, S.; Roth, U.; Klages, S.; Amon, T.: Qualität und Verwertung des Gärrestes. In: *Leitfaden Biogas – Von der Gewinnung zur Nutzung*. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (Hrsg.), 5. Auflage. Gülzow 2010, 211-232. Online: http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/pdf_208-leitfaden_biogas_2010_neu.pdf (05.09.2012).
- Dumontet, S.; Dinel, H.; Baloda, S.B. (1999): Pathogen reduction in sewage sludge by composting and other biological treatments: A review. *Biological Agriculture and Horticulture* 16, 409-430.
- Edwards, C.A.; Bohlen, P.J.: *Biology and Ecology of Earthworms*. 3. Auflage. London: Chapman & Hall 1996, 426 Seiten.
- Edwards, C.A.; Lofty, J.R. (1982): Nitrogenous fertilizers and earthworm populations in agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry* 14, 515-521.
- Eiler, T. (2007): Sachgerechte Verwertung von Gärresten aus der Biogaserzeugung. Online: http://www.nova-institut.de/news-images/20070427-02/artikel_biogas.pdf (29.05.2012).

- Eiler, T. (2008): Verwertung von Gärresten aus der Biogasanlage – Düngewirkung steigt, Geruch nimmt ab. *Mais* 4 (35. Jg.), 130-133.
- Erhard, H.: Aus der Geschichte der Städtereinigung. Stuttgart und Köln: W. Kohlhammer Verlag 1954, 68 Seiten.
- Ernst, G.; Müller, A.; Göhler, H.; Emmerling, C. (2008): C and N turnover of fermented residues from biogas plants in soil in the presence of three different earthworm species (*Lumbricus terrestris*, *Aporrectodea longa*, *Aporrectodea caliginosa*). *Soil Biology and Biochemistry* 40, 1413-1420.
- Fachverband Biogas e. V. (2012): Branchenzahlen. Online: www.biogas.org (30.08.2012).
- FAL (Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft): Ergebnisse des Biogasmessprogramms. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (Hrsg.). Gülzow 2005, 163 Seiten.
- Farrah, S.R.; Bitton, G. (1983): Bacterial survival and association with sludge flocs during aerobic and anaerobic digestion of wastewater sludge under laboratory conditions. *Applied Environmental Microbiology* 45 (1), 174-181.
- Feil, B.; Bänziger, M. (1999): Beziehungen zwischen Kornertrag und den Konzentrationen von Protein, Phosphor und Kalium in den Körnern von Sommerweizensorten. *Pflanzenbauwissenschaften* 3 (1), 1-8.
- Fischer, E.; Molnár, L. (1997): Growth and Reproduction of *Eisenia fetida* (Oligochaeta, Lumbricidae) in semi-natural soil containing various metal chlorides. *Soil Biology and Biochemistry* 29 (4/4), 667-670.
- Fois, S.; Motzo, R.; Giunta, F. (2009): The effect of nitrogenous fertiliser application on leaf traits in durum wheat in relation to grain yield and development. *Field Crop Research* 110, 69-75.
- Francou, C. (2003): Stabilisation de la matière organique au cours du compostage de déchets urbains: Influence de la nature des déchets et du procédé de compostage – Recherche d'indicateurs pertinents. These, Institut National Agronomique Paris-Grignon, 288 Seiten.
- Fredeen, A.L.; Madhusudana Rao, I.; Terry, N. (1989): Influence of Phosphorus Nutrition on Growth and Carbon Partitioning in *Glycine max*. *Plant Physiology* 89, 225-230.
- Frederick, J.R.; Bauer, P.J.: Physiological and Numerical Components of Wheat Yield. In: *Wheat: Ecology and Physiology of Yield Determination*. Satorre, E.H.; Slafer, G.A. (Hrsg.). New York: The Harworth Press 1999, 503 Seiten.
- Frick, R., Menzi, H., Katz, P. (1996): Ammoniakverluste nach der Hofdüngeranwendung – Stark unterschiedliche Verluste je nach Bedingungen. In: *FAT-Berichte* 486. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (Hrsg.), 10 Seiten. Online: <http://www.blw.admin.ch/themen/00010/00071/00129/index.html?lang=de&download=N>

- HZLPZeg7t,lnp6l0NTU042l2Z6ln1acy4Zn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpJCDen9,gmym162epYbg2c_JjKbNoKSn6A-- (18.05.2011).
- Friehe, J.; Weiland, P.; Schattauer, A.: Grundlagen der anaeroben Fermentation. In: Leitfaden Biogas – Von der Gewinnung zur Nutzung. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (Hrsg.). 5. Auflage. Gülzow 2010, 17-20. Online: http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/pdf_208-leitfaden_biogas_2010_neu.pdf (05.09.2012).
- Fujinuma, R.; Balster, N.J.; Norman, J.M. (2009): An Improved Model of Nitrogen Release for Surface-applied Controlled-release Fertilizer. *Soil Science Society of America Journal* 73 (6), 2043-2050.
- Garg, R.N.; Pathak, H.; Das, D.K.; Tomar, R.K. (2005): Use of flyash and biogas slurry for improving wheat yield and physical properties of soil. *Environmental monitoring and assessment* 107, 1-9.
- Gericke, D.; Pacholski, A.; Kage, H. (2007): NH₃-Emissionen bei der ackerbaulichen Nutzung von Gärrückständen aus Biogasanlagen. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften* 19, 280-281.
- Gill, R.A.; Polley, H.W.; Johnson, H.B.; Anderson, L.J.; Maherali, H.; Jackson, R.B. (2002): Nonlinear grassland responses to past and future atmospheric CO₂. *Nature* 417, 279-282.
- Göhler, H.; Emmerling, C. (2007): Landwirtschaftliche Verwertung von Gärrückständen aus NaWaRo-Biogasanlagen. Endbericht. Online: <http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22011201.pdf> (17.11.2007).
- Gosch, K. (2007): Wichtig für die Düngeplanung – Gülleuntersuchung. *Landpost* vom 10. März 2007, 40-42. Online: http://lwks.de/cms/fileadmin/user_upload/Presse/BB_1007_10.03.2007/40-42_Gosch.pdf (20.05.2010).
- Graff, O.: Unsere Regenwürmer – Lexikon für Freunde der Bodenbiologie. Hannover: Schaper 1983, 112 Seiten.
- Gruner, P. (2008): Einfluss von Gärprodukten aus der Monofermentation von Energiepflanzen auf Lumbriciden eines mittel schluffigen Sandbodens. Bachelorarbeit, Humboldt-Universität zu Berlin, 63 Seiten.
- Gunnarsson, A.; Bengtsson, F.; Caspersen, S. (2010): Use efficiency of nitrogen from biodegraded plant material by ryegrass. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 173, 113-119.
- Hansen, S.; Engelstad, F. (1999): Earthworm populations in a cool and wet district as affected by tractor traffic and fertilisation. *Applied Soil Ecology* 13, 237-250.
- Hensen, V. (1877): Die Thätigkeit des Regenwurms (*Lumbricus terrestris* L.) für die Fruchtbarkeit des Erdbodens. *Zeitschrift für wissenschaftliche Zoologie* 28, 354-364.

- Hund-Rinke, K.; Wiechering, H. (2001): Earthworm Avoidance Test for Soil Assessments. *Journal of Soils and Sediments* 1 (1), 15-20.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Working Group 1: Climate Change 1995 – The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton, J.T.; Meira Filho, L.G.; Callander, B.A.; Harris, N.; Kattenberg, A.; Maskell, K. (Hrsg.). Cambridge: University Press 1996, 588 Seiten.
- Islam, R.; Rahman, S.M.E.; Rahman, M.; Oh, D.H.; Ra, C.S. (2010): The effects of biogas slurry on the production and quality of maize fodder. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 34, 91-99.
- Kaplan, D.L.; Hartenstein, R.; Neuhauser, E.F.; Malecki, M.R. (1980): Physicochemical requirements in the environment of the earthworm *Eisenia fetida*. *Soil Biology and Biochemistry* 12, 347-352.
- Karmegam, N.; Daniel, T. (2007): Effect of Physico-chemical Parameters on Earthworm Abundance: A Quantitative Approach. *Journal of Applied Sciences Research* 3 (11), 1369-1376.
- Kautz, T.; Rauber, R. (2007): Einfluss der Düngung mit Gärrückständen aus der Biogaserzeugung auf den Ertrag von Silomais und auf die bodenmikrobielle Aktivität. Online: <http://orgprints.org/view/projects/wissenschaftstagung-2007.html> (07.05.2008).
- Kearney, T. E.; Larkin, M. J.; Levett, P. N. (1993): The effect of slurry storage and anaerobic digestion on survival of pathogenic bacteria. *Journal of Applied Bacteriology* 74, 86-93.
- Kirchmann, H.; Bernal, M. P. (1997): Organic waste treatment and C stabilization efficiency. *Soil Biology and Biochemistry* 29 (11/12), 1747-1753.
- Kirsch, A.; Franken, H.; Blanke, M. (2000): Feldmethode zur Bestimmung der substrat-induzierten Bodenatmung. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 163, 165-171.
- Klimanek, E.-M.; Schulz, E. (1997): C/N-Transformationsprozesse beim Umsatz von organischer Primärsubstanz (OPS) im Boden. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* 41, 513-525.
- Knie, A.; Haumacher, R.; Philipp, W.; Martens, W.; Böhm, R. (2001): Untersuchungen zur Seuchen- und Phytohygiene in Anaerobanlagen (Halb- bzw. großtechnische Anlagen). Forschungsbericht FZKA-BWPLUS. Online: <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/40085/PUGU98009SBer.pdf?command=downloadContent&filename=PUGU98009SBer.pdf&FIS=203> (24.07.2009).
- Knittel, H., Albert, E.: *Praxishandbuch Dünger und Düngung*. Bergen/Dumme: Agrimedia GmbH 2003, 312 Seiten.
- Kononova, M. M.: *Die Humusstoffe des Bodens*. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften 1958, 341 Seiten.

- Koriath, H.; Bölke, M.; Wedekind, P.; Lehmann, R.; Asmus, F.; Lange, H.; Görlitz, H.; Schmerler, J.; Ebert, K.; Kreiß, K.; Hörnig, G.; Gellrich, J.; Boese, E.; Koß, U.; Specht, G.: Güllewirtschaft – Gülledüngung. Berlin DDR: VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag (1975), 272 Seiten.
- Körschens, M. (1997): Abhängigkeit der organischen Substanz (OBS) von Standort und Bewirtschaftung sowie ihr Einfluss auf Ertrag und Bodeneigenschaften. Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde 41, 435-463.
- Körschens, M. (1980): Die Abhängigkeit der organischen Bodensubstanz von Standortfaktoren und acker- und pflanzenbaulichen Maßnahmen, ihre Beziehung zu Bodeneigenschaften und Ertrag sowie Ableitung von ersten Bodenfruchtbarkeitskennziffern für den Gehalt des Bodens an organischer Substanz. Promotionsarbeit aus dem Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, Bereich Bad Lauchstädt, 130 Seiten (plus Anlagenband).
- Körschens, M.; Schulz, E.; Behm, R. (1990): Heißwasserlöslicher C und N im Boden als Kriterium für das N-Nachlieferungsvermögen. Zentralblatt für Mikrobiologie 145, 305-311.
- Körschen, M.; Schulz, E.; Klimanek, E.-M.; Franko, U. (1997): Die organische Bodensubstanz – Bedeutung, Definition, Bestimmung. Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde 41, 427-433.
- Krück, S. (2009): persönliche Mitteilung.
- Kübler, E.: Weizenanbau. Stuttgart: Eugen Ulmer 1994, 191 Seiten.
- Kühle, J.C.: Adaption of earthworm populations to different soil treatments in an apple orchard. In: New Trends in Soil Biology - Proceedings of the VIII International Colloquium of Soil Zoology, Louvain-la-Neuve (Belgium) 1982. Lebrun, P.; André, H.M.; De Medts, A.; Gregoire-Wibo, C.; Wauthy, G. (Hrsg.). Université Catholique de Louvain 1983, 487-501.
- Kula, H.; Kokta, C. (1992): Side effects of selected pesticides on earthworms under laboratory and field conditions. Soil Biology and Biochemistry 24 (12), 1711-1714.
- Kuzyakov, Y. (2006): Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods. Soil Biology and Biochemistry 38, 425-448.
- Kuzyakov, Y.; Friedel, J. K.; Stahr, K. (2000): Review of mechanisms and quantification of priming effects. Soil Biology and Biochemistry 32, 1485-1498.
- Larink, O. (1991): Bodentiere als Bewohner und Gestalter des Bodenraumes. Berichte über Landwirtschaft: Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit 2 (Sonderheft, 204). Hamburg, Berlin: Paul Parey, 83-95.
- Lee, K. E.: Earthworms – Their Ecology and Relationships with soils and landuse. New York, Sydney, London: Academic Press (1985), 411 Seiten.

- Leroy, B.L.M.; Schmidt, O.; Van den Bossche, A.; Reheul, D.; Moens, M. (2008): Earthworm population dynamics as influenced by the quality of exogenous organic matter. *Pedobiologia* 52, 139-150.
- Leroy, B.L.M.; Van den Bossche, A.; De Neve, S.; Reheul, D.; Moens, M. (2007): The quality of exogenous organic matter: Short-term influence on earthworm abundance. *European Journal of Soil Biology* 43, 196-200.
- Loria, E.R.; Sawyer, J.E.; Barker, D.W.; Lundvall, J.P.; Lorimor, J.C. (2007): Use of Anaerobically Digested Swine Manure as a Nitrogen Source in Corn Production. *Agronomy Journal* 99, 1119-1129.
- LTZ (Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg) (2008): Inhaltsstoffe von Gärprodukten und Möglichkeiten zu ihrer geordneten pflanzenbaulichen Verwertung. Projektbericht. Online: http://www.landwirtschaft-mlr.baden-wuerttemberg.de/servlet/PB/show/1241517_11/ltz_Projektbericht%20Inhaltsstoffe-%20von%20Gaerprodukten%20und%20Moeglichkeiten%20zu%20ihrer%20geordneten%20Verwertung.pdf (05.05.2009).
- LWK NRW (Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen) (2011): Hinweise zum Einsatz von Wirtschaftsdüngern, organischen und organisch-mineralischen Düngern – Ratgeber 2011. Online: <http://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/duengung/basisinfos/wirtschaftsduenger-pdf.pdf> (19.05.2011).
- Lynch, J.; Läuchli, A.; Epstein, E. (1991): Vegetative Growth of the Common Bean in Response to Phosphorus Nutrition. *Crop Science* 31, 380-387.
- Ma, W.; Bodt, J. (1993): Differences in Toxicity of the Insecticide Chlorpyrifos to Six Species of Earthworms (Oligochaeta, Lumbricidae) in Standardized Soil Tests. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 50, 864-870.
- Malhi, S.S.; McGill, W.B. (1982): Nitrification in Three Alberta Soils: Effect of Temperature, Moisture and Substrate Concentration. *Soil Biology and Biochemistry* 14, 393-399.
- Marcato, C.-E.; Mohtar, R.; Revel, J.-C.; Pouech, P.; Hafidi, M.; Guirresse, M. (2009): Impact of anaerobic digestion on organic matter quality in pig slurry. *International Biodeterioration and Biodegradation* 63, 260-266.
- Marschner, H.: Mineral Nutrition of Higher Plants. 2. Auflage. London: Academic Press Limited (1995), 889 Seiten.
- Möller, K.; Stinner, W. (2009): Effects of different manuring systems with and without biogas digestion on soil mineral nitrogen content and on gaseous nitrogen losses (ammonia, nitrous oxides). *European Journal of Agronomy* 30, 1-16.
- Müller, G.: Bodenkunde. DDR Berlin: VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag (1980), 392 Seiten.
- Myers, R.J.K. (1975): Temperature effects on Ammonification and Nitrification in a Tropical Soil. *Soil Biology and Biochemistry* 7, 83-86.

- Nielsen, J.D. (1972): Fixation and release of potassium and ammonium ions in Danish soils. *Plant and Soil* 36, 71-88.
- Odlare, M.; Pell, M.; Svensson, K. (2008): Changes in soil chemical and microbial properties during 4 years of application of various organic residues. *Waste Management* 28, 1246-1253.
- Olsen, J.E.; Larsen, H.E. (1987): Bacterial decimation times in anaerobic digestion of animal slurries. *Biological Wastes* 21, 153-168.
- Owojori, O.J.; Reinecke, A.J. (2009): Avoidance behaviour of two eco-physiologically different earthworms (*Eisenia fetida* and *Aporrectodea caliginosa*) in natural and artificial saline soils. *Chemosphere* 75, 279-283.
- Peretzki, F.; Müller, C.; Dittmann, T. (2005): Düngerfabrik Biogasanlage. Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt 7. Online: http://www.lfl.bayern.de/arbeitsschwerpunkte/as_biogas/11517/linkurl_0_28.pdf (19.05.2011).
- Pötsch, E. (2004): Nährstoffgehalt von Gärrückständen aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen und deren Einsatz im Dauergrünland. Abschlussbericht. Online: http://www.raumberg-gumpenstein.at/c/index.php?option=com_content&task=view&id=221&Itemid=197 (13.10.2009).
- Quakernack, R.; Pacholski, A.; Techow, A.; Herrmann, A.; Taube, F.; Kage, H. (2012): Ammonia volatilization and yield response of energy crops after fertilization with biogas residues in a coastal marsh of Northern Germany. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 160, 66-74.
- Reinhold, G. (1988): Untersuchungen zur großtechnischen Erzeugung und Verwertung von Biogas bei Berücksichtigung der Substratveränderungen. Dissertation, Technische Hochschule Merseburg, Sektion Verfahrenstechnik, 320 Seiten.
- Reinhold, G.; Klimanek, E.-M.; Breitschuh, G. (1991): Zum Einfluss der Biogaserzeugung auf Veränderungen in der Kohlenstoffdynamik von Gülle. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* 35 (2), 129-137.
- Reuter, G.: Gelände- und Laborpraktikum der Bodenkunde. 3. Auflage. Berlin: Deutscher Landwirtschaftsverlag 1976, 80 Seiten.
- Roschke, M. (2004): Bericht zur Überwachung des Inverkehrbringens von Düngemitteln 2003. Online: http://www.mugv.brandenburg.de/cms/media.php/lbm1.a.2320.de/dungm_04.pdf (18.06.2010).
- Roschke, M.; Böhm, L.; Kohlmüller, S.; Krüger, K.; Pickert, J.; Wurbs, A.; Hierold, W.; Peschke, H.; Feller, C.; Fink, M. (2000): Rahmenempfehlungen zur Düngung 2000 im Land Brandenburg. Ministerium für Landwirtschaft, Umweltschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg (Hrsg.). Online: <http://www.brandenburg.de/cms/media.php/2331/duengbro.pdf> (11.08.2008).

- Sauvé, S.; Fournier, M. (2005): Age-specific immunocompetence of the earthworm *Eisenia andrei*: exposure to methylmercury chloride. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 60, 67-72.
- Scheffer, F.; Schachtschabel, P.: Lehrbuch der Bodenkunde. 15. Auflage. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag 2002, 593 Seiten.
- Scherer, H. W. (1989): Einfluss des Zeitpunktes der K-Düngung auf die Dynamik des nach der Gülledüngung spezifisch gebundenen $\text{NH}_4\text{-N}$ der Tonminerale. *Journal of Agronomy and Crop Science* 163 (3), 190-195.
- Scheu, S. (1987): Microbial activity and nutrient dynamics in earthworm casts (Lumbricidae). *Biology and Fertility of Soils* 5, 230-234.
- Schilling, G.: Pflanzenernährung und Düngung. 4. Auflage. Stuttgart: Eugen Ulmer 2000. 464 Seiten.
- Schrade, S.; Oechsner, H.; Pekrun, C.; Claupein, W. (2003): Einfluss des Biogasprozesses auf die Keimfähigkeit von Samen. *Landtechnik* 58 (2), 90-91.
- Schroeder, D.; Bluhm, W.: Bodenkunde in Stichworten. 5. Auflage. Berlin, Stuttgart: Borntraeger 1992, 175 Seiten.
- Schulz, E. (1997): Charakterisierung der organischen Bodensubstanz (OBS) nach dem Grad ihrer Umsetzbarkeit und ihre Bedeutung für Transformationsprozesse für Nähr- und Schadstoffe. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* 41, 465-483.
- Sensel, K.; Nielsen, K.; Wragge, V.; Rühlmann, J.: Carbon dynamics of anaerobic residues from biogas plants using energy plants. In: 19th European Biomass Conference – From Research to Industry and Markets. Proceedings of the International Conference held in Berlin, Germany, 6-10 June 2011. Faulstich, M.; Ossenbrink, H.; Dallemann, J.F.; Baxter, D.; Grassi, A.; Helm, P. (Hrsg.), 855-858.
- Sindhu, M.A.; Cornfield, A.H. (1967): Effect of sodium chloride and moisture content on ammonification and nitrification in incubated soil. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 18, 505-506.
- Sionit, N.; Hellmers, H.; Strain, B. R. (1980): Growth and Yield of Wheat under CO_2 Enrichment and Water Stress. *Crop Science* 20, 687-690.
- Smith, F. A. (1966): Active phosphate uptake by *Nitella Translucens*. *Biochimica et Biophysica acta* 126, 94-99.
- Spurgeon, D.J.; Hopkin, S.P. (1996): The effects of metal contamination on earthworm populations around a smelting works: quantifying species effects. *Applied Soil Ecology* 4, 147-160.
- Stahr, K.; Kandeler, E.; Herrmann, L.; Streck, T.: Bodenkunde und Standortlehre. 1. Auflage. Stuttgart: Eugen Ulmer 2008, 318 Seiten.

- Staiß, F.; Linkohr, C.; Zimmer, U.: Erneuerbare Energien in Zahlen – nationale und internationale Entwicklung. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.). Paderborn: Bonifatius 2007, 59 Seiten.
- Svensson, K.; Odlare, M.; Pell, M. (2004): The fertilizing effect of compost and biogas residues from source separated household waste. *Journal of Agricultural Science* 142, 461-467.
- Terhoeven-Urselmans, T.; Scheller, E.; Raubuch, M.; Ludwig, B.; Joergensen, R.G. (2009): CO₂ evolution and N mineralization after biogas slurry application in the field and its yield effects on spring barley. *Applied Soil Ecology* 42, 297-302.
- Tiunov, A.V.; Scheu, S. (2004): Carbon availability controls the growth of detritivores (Lumbricidae) and their effect on nitrogen mineralization. *Oecologia* 138 (1), 83-90.
- Ullrich, W.; Urbach, W.; Santarius, K.A.; Heber, U. (1965): Die Verteilung des Orthophosphates auf Plastiden, Cytoplasma und Vakuole in der Blattzelle und ihre Veränderung im Licht-Dunkel-Wechsel. *Zeitschrift für Naturforschung* 20 (b), 905-910.
- Ullrich-Eberius, C.; Novacky, A.; van Bel, A. (1984): Phosphate uptake in *Lemna gibba* G1: energetics and kinetics. *Planta* 161, 46-52.
- Unterfrauner, H.; Somitsch, W.; Peticzka, R.; Brauneins, S.; Schlaipfer, M. (2010): Auswirkung von Biogasgülle auf Bodenparameter. 2. Umweltökologisches Symposium 2010, 59-64. Online: <http://media.manila.at/oekl/gems/Unterfrauner1.pdf> (21.06.2011).
- Unwin, R. J.; Lewis, S. (1986): The Effect upon Earthworm Populations of very large Applications of Pig Slurry to Grassland. *Agricultural Wastes* 16, 67-73.
- Utermann, J.; Gorny, A.; Hauenstein, M.; Malessa, V.; Müller, U.; Scheffer, B.: Labormethoden-Dokumentation. Geologisches Jahrbuch Reihe G (8). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Staatliche Geologische Dienste in der Bundesrepublik Deutschland (Hrsg.). Hannover: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung Stuttgart 2000, 215 Seiten.
- Werth, M.; Kuzyakov, Y. (2007): Unterteilung des CO₂-Gesamteffluxes aus einem Maisackerboden durch natürliche ¹³C-Markierung und Vergleich mit einem Schwarzbracheboden. *Mitteilungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft* 110 (1), 399-400.
- Wiese, J.; König, R. (2008): Einsatz von Mess- und Automatisierungstechnik auf modernen Biogasanlagen – Ergebnisse großtechnischer Anwendungen. *energie | wasser-praxis* 11, 16-21. Online: http://www.dvgw.de/uploads/media/0811wiese_01.pdf (13.09.2011).
- Wulf, S.; Maeting, M.; Clemens, J. (2002): Application technique and slurry co-fermentation effects on ammonia, nitrous oxide, and methane emissions after spreading: I. Ammonia volatilization. *Journal of Environmental Quality* 31, 1789-1794.
- Yara, Institut für Pflanzenernährung und Umweltforschung Hanningshof (2004): N-Tester - Messgerät zur Ermittlung des Stickstoffdüngedarfs. Handbuch zum Yara N-Tester

- Yasuhara, A.; Fuwa, K. (1979): Odor and Volatile Compounds in Liquid Swine Manure. III. Volatile and Odorous Components in Anaerobically or Aerobically Digested Liquid Swine Manure. Bulletin of the Chemical Society of Japan 52 (1), 114-117.
- Zak, D.; Gelbrecht, J.; Wagner, C.; Payer, B.; Augustin, J. (2010): Phosphorus mobilization in rewetted fens: the effect of altered peat properties and implications for their restoration. Ecological Applications 20 (5), 1336-1349.
- Zethner, G.; Pfundtner, E.; Humer, J. (2002): Qualität von Abfällen aus Biogasanlagen. Monographien 160. Umweltbundesamt Wien (Hrsg.). Wien: Riegelnik 2002, 50 Seiten. Online: <http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/M160.pdf> (07.05.2010).

Analysenstandards

- DIN ISO 10694:1996-08: Bodenbeschaffenheit – Bestimmung von organischem Kohlenstoff und Gesamtkohlenstoff nach trockener Verbrennung (Elementaranalyse).
- DIN ISO 13878:1998-11: Bodenbeschaffenheit – Gesamt-Stickstoff durch trockene Verbrennung (Elementaranalyse).
- DIN ISO 23611-1:2006: Soil quality – Sampling of soil invertebrates – Part 1: Hand-sorting and formalin extraction of earthworms.
- VDLUFA (Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten): Methodenbuch Band I: Die Untersuchung von Böden, Teillieferung 1. Darmstadt: VDLUFA-Verlag (1991), 426 Seiten.
- VDLUFA (Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten): Methodenbuch Band I: Die Untersuchung von Böden, Teillieferung 2. Darmstadt: VDLUFA-Verlag (1997), 540 Seiten.
- VDLUFA (Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten): Methodenbuch Band I: Die Untersuchung von Böden, Teillieferung 4. Darmstadt: VDLUFA-Verlag (2004), 134 Seiten.
- VDLUFA (Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten): Methodenbuch Band VII: Umweltanalytik. 3. Auflage. Darmstadt: VDLUFA-Verlag (2008), ca. 500 Seiten.

Rechtliche Grundlagen

- Düngegesetz vom 09. Januar 2009. BGBl 1, S.54, zuletzt geändert durch Art. 1 G vom 15. März 2012, S. 481
- Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG) vom 25. Oktober 2008. BGBl 1, S. 2074

- Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG) vom 24. Februar 2012. BGBl 1, S. 212
- Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien. Abl. L 312 vom 22.11.2008, S. 3
- Tierische Nebenprodukte Beseitigungsgesetz (TierNebG) vom 25. Januar 2004. BGBl 1, S.82
- Verordnung (EG) Nr. 889/2008 der Kommission vom 5. September 2008 mit Durchführungsvorschriften zur Verordnung (EG) Nr. 834/2007 des Rates über die ökologische/biologische Produktion und die Kennzeichnung von ökologischen/biologischen Erzeugnissen hinsichtlich der ökologischen/biologischen Produktion, Kennzeichnung und Kontrolle. Abl. L 250 vom 18.9.2008, S. 1
- Verordnung (EG) Nr. 1069/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 mit Hygienevorschriften für nicht für den menschlichen Verzehr bestimmte tierische Nebenprodukte und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 1774/2002 (Verordnung über tierische Nebenprodukte). Abl. L 300 vom 14.11.2009, S. 1
- Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung – DüMV) vom 16. Dezember 2008. BGBl 1, S. 2524, zuletzt geändert durch die Verordnung vom 14. Dezember 2009, S. 3905
- Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung – DüV) vom 10. Januar 2006. BGBl 1, S. 33, Neufassung vom 27. Februar 2007, BGBl 1, S. 221, zuletzt geändert durch Art. 5 Abs. 36 G vom 24.2.2012, S. 212
- Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung – BioAbfV) vom 21. September 1998. BGBl 1, S. 2955, zuletzt geändert durch Art. 1 und Art. 4 V vom 23. April 2012, S. 611
- Verordnung zur Durchführung des Tierische Nebenprodukte Beseitigungsgesetzes (Tierische Nebenprodukte Beseitigungsverordnung – TierNebV) vom 27. Juli 2006. BGBl 1, S. 1735

ANHANG

Tabelle 7-1: Signifikante Wirkungen der Faktoren Dünger und Aufwandmenge sowie deren Wechselwirkungen im F-Test bzw. Unterschiede der Dünger in der Aufwandmenge 150 kg ha⁻¹ N zur Kontrolle im t-Test der bodenchemischen Parameter ($\alpha = 0,05$; x = signifikante Wirkung)

Probenahme-zeitpunkt	Faktor	SCHLAG 1 (Sommerweizen, Ölrettich, Silomais)									SCHLAG 2 (Silomais, Sommerweizen)								
		C _{ges}	C _{hwl}	N _{ges}	N _{hwl}	N _{min} 0-30 cm	N _{min} 30-60 cm	P _{DL}	K _{DL}	pH-Wert	C _{ges}	C _{hwl}	N _{ges}	N _{hwl}	N _{min} 0-30 cm	N _{min} 30-60 cm	P _{DL}	K _{DL}	pH-Wert
Herbst 2006	Dünger	X	X					X	X	X									
	Aufwandmenge					X	X	X	X		X				X			X	
	Dünger x Aufwandmenge					X		X	X									X	
	GP A (168 kg ha ⁻¹ N) - Kontrolle GP B (129 kg ha ⁻¹ N) - Kontrolle GP C (124 kg ha ⁻¹ N) - Kontrolle MD (150 kg ha ⁻¹ N) - Kontrolle							X	X								X		
Frühjahr 2007	Dünger		X		X														
	Aufwandmenge							X	X										
	Dünger x Aufwandmenge						X				X								
	GP A (150 kg ha ⁻¹ N) - Kontrolle GP B (150 kg ha ⁻¹ N) - Kontrolle GP C (150 kg ha ⁻¹ N) - Kontrolle MD (150 kg ha ⁻¹ N) - Kontrolle						X												
Herbst 2007	Dünger							X										X	
	Aufwandmenge							X	X		X							X	
	Dünger x Aufwandmenge																		
	GP A (150 kg ha ⁻¹ N) - Kontrolle GP B (150 kg ha ⁻¹ N) - Kontrolle GP C (150 kg ha ⁻¹ N) - Kontrolle MD (150 kg ha ⁻¹ N) - Kontrolle							X	X	X								X X	

Tabelle 7-2: Gesamtkohlenstoffgehalte (C_{ges}) und Gehalte an heißwasserlöslichen Kohlenstoff (C_{hwl}) des Bodens in den Parzellenfeldversuchen in Abhängigkeit der Düngerart, der Aufwandmenge und des Probenahmezeitpunktes

Vergleiche wurden für Kombinationsmittelwerte (pro Düngerart Vergleich der Aufwandmengen) durchgeführt (kleine Buchstaben), im Fall nicht signifikanter Wechselwirkungen wurden außerdem die Hauptmittelwerte der Düngerarten und Aufwandmengen verglichen (große Buchstaben); Mittelwerte mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant, Auswertung für Schlag 1, Herbst 2006 für C_{ges} und C_{hwl} sowie im Schlag 2, Herbst 2006 für C_{hwl} mittels Rangvergleich 5 %, ansonsten Tukey-Test mit $\alpha = 0,05$

Probenahme-zeitpunkt	N-Stufe / N-Aufwand-menge	SCHLAG 1 (Sommerweizen, Ölrettich, Silomais)										SCHLAG 2 (Silomais, Sommerweizen)									
		GP A		GP B		GP C		MD		Mittelwert		GP A		GP B		GP C		MD		Mittelwert	
		C_{ges} [mg 100 g ⁻¹]	C_{hwl} [mg 100 g ⁻¹]	C_{ges} [mg 100 g ⁻¹]	C_{hwl} [mg 100 g ⁻¹]	C_{ges} [mg 100 g ⁻¹]	C_{hwl} [mg 100 g ⁻¹]	C_{ges} [mg 100 g ⁻¹]	C_{hwl} [mg 100 g ⁻¹]	C_{ges} [mg 100 g ⁻¹]	C_{hwl} [mg 100 g ⁻¹]	C_{ges} [mg 100 g ⁻¹]	C_{hwl} [mg 100 g ⁻¹]	C_{ges} [mg 100 g ⁻¹]	C_{hwl} [mg 100 g ⁻¹]	C_{ges} [mg 100 g ⁻¹]	C_{hwl} [mg 100 g ⁻¹]	C_{ges} [mg 100 g ⁻¹]	C_{hwl} [mg 100 g ⁻¹]	C_{ges} [mg 100 g ⁻¹]	C_{hwl} [mg 100 g ⁻¹]
Frühjahr 2006	Schlag gesamt	Ausgangswerte: $C_{\text{ges}} = 1103 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ $C_{\text{hwl}} = 43 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$										Ausgangswerte: $C_{\text{ges}} = 1021 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ $C_{\text{hwl}} = 41 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$									
Herbst 2006	0 kg ha ⁻¹ N	1161 ^a	36 ^b	1229 ^b	38 ^a	1179 ^a	41 ^a	1135 ^a	27 ^a	1176 ^A	36 ^A	1075 ^a	39 ^a	1011 ^a	40 ^a	1062 ^a	38 ^a	1069 ^a	32 ^a	1054 ^{AB}	37 ^A
	N-Stufe 1*	1156 ^a	33 ^a	1086 ^a	33 ^a	1149^a	40^a	1160 ^a	32 ^a	1137 ^A	34 ^A	1021 ^a	41 ^a	1015 ^a	41 ^a	1029^a	40^a	1022 ^a	31 ^a	1022 ^A	39 ^A
	N-Stufe 2*	1166^a	39^b	1115^b	33^a	1184 ^a	43 ^a	1116 ^a	33 ^a	1145 ^A	37 ^A	1006^a	39^a	1028^a	43^a	1030 ^a	41 ^a	1055 ^a	31 ^a	1030 ^{AB}	38 ^A
	N-Stufe 3*	1193 ^a	39 ^{ab}	1133 ^{ab}	33 ^a	1196 ^a	41 ^a	1127^a	29^a	1162 ^A	36 ^A	1115 ^a	44 ^a	1028 ^a	40 ^a	1159 ^a	43 ^a	1036^a	33^a	1084 ^B	40 ^A
	Mittelwert	1169 ^{AB}	37 ^B	1141 ^A	34 ^B	1177 ^B	41 ^C	1135 ^A	30 ^A	1155	36	1054 ^A	41 ^B	1021 ^A	41 ^B	1070 ^A	41 ^B	1045 ^A	32 ^A	1048	39
Frühjahr 2007	0 kg ha ⁻¹ N	1131 ^a	21 ^a	1090 ^a	22 ^a	1114 ^a	26 ^a	1131 ^a	28 ^a	1117 ^A	24 ^A	961 ^a	21 ^a	951 ^a	21 ^a	995 ^a	24 ^a	957 ^a	22 ^a	966 ^A	22
	50 kg ha ⁻¹ N	1128 ^a	24 ^a	1077 ^a	23 ^a	1139 ^a	27 ^a	1106 ^a	27 ^a	1112 ^A	25 ^A	1011 ^a	22 ^a	962 ^a	21 ^a	982 ^a	23 ^a	1009 ^a	26 ^a	991 ^A	23
	100 kg ha ⁻¹ N	1142 ^a	24 ^a	1115 ^a	21 ^a	1126 ^a	23 ^a	1128 ^a	25 ^a	1128 ^A	23 ^A	995 ^a	21 ^a	985 ^a	24 ^a	986 ^a	22 ^a	1007 ^a	22 ^a	993 ^A	22
	150 kg ha ⁻¹ N	1144 ^a	25 ^a	1095 ^a	22 ^a	1122 ^a	23 ^a	1114 ^a	28 ^a	1119 ^A	24 ^A	990 ^a	23 ^a	986 ^a	23 ^a	969 ^a	22 ^a	987 ^a	23 ^a	983 ^A	23
	Mittelwert	1136 ^A	24 ^{AB}	1094 ^A	22 ^A	1125 ^A	25 ^{AB}	1120 ^A	27 ^B	1119	24	989 ^A	22	971 ^A	22	983 ^A	23	990 ^A	23	983	22
Herbst 2007	0 kg ha ⁻¹ N	1106 ^a	25 ^a	1028 ^a	25 ^a	1063 ^a	29 ^a	1073 ^a	28 ^a	1067 ^A	27 ^A	958 ^a	30 ^a	945 ^a	26 ^a	995 ^a	26 ^a	952 ^a	28 ^a	963 ^A	28 ^A
	50 kg ha ⁻¹ N	1103 ^a	25 ^a	1068 ^a	27 ^a	1113 ^a	28 ^a	1063 ^a	27 ^a	1087 ^A	27 ^A	1014 ^a	30 ^a	952 ^a	29 ^a	971 ^a	27 ^a	1000 ^a	31 ^a	984 ^{AB}	29 ^A
	100 kg ha ⁻¹ N	1092 ^a	24 ^a	1052 ^a	27 ^a	1100 ^a	28 ^a	1066 ^a	29 ^a	1078 ^A	27 ^A	1034 ^a	32 ^a	982 ^a	32 ^a	986 ^a	29 ^a	1000 ^a	28 ^a	1000 ^{AB}	30 ^A
	150 kg ha ⁻¹ N	1129 ^a	26 ^a	1113 ^a	29 ^a	1098 ^a	30 ^a	1086 ^a	29 ^a	1107 ^A	28 ^A	996 ^a	32 ^a	1012 ^a	29 ^a	1045 ^a	30 ^a	974 ^a	27 ^a	1007 ^B	29 ^A
	Mittelwert	1108 ^A	25 ^A	1065 ^A	27 ^A	1094 ^A	29 ^A	1072 ^A	28 ^A	1085	27	1000 ^A	31 ^A	973 ^A	29 ^A	999 ^A	28 ^A	982 ^A	29 ^A	988	29

* die fett markierten Werte entsprechen einer N-Aufwandmenge von ca. 150 kg ha⁻¹ N

Tabelle 7-3: Gesamtstickstoffgehalte (N_{ges}) und Gehalte an heißwasserlöslichen Stickstoff (N_{hwl}) des Bodens in den Parzellenfeldversuchen in Abhängigkeit der Düngerart, der Aufwandmenge und des Probenahmezeitpunktes

Vergleiche wurden für Kombinationsmittelwerte (pro Düngerart Vergleich der Aufwandmengen) durchgeführt (kleine Buchstaben), im Fall nicht signifikanter Wechselwirkungen wurden außerdem die Hauptmittelwerte der Düngerarten und Aufwandmengen verglichen (große Buchstaben); Mittelwerte mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant, Auswertung für Schlag 2, Herbst 2006 für N_{hwl} sowie Frühjahr 2007 für N_{hwl} mittels Rangvergleich 5 %, ansonsten Tukey-Test mit $\alpha = 0,05$

Probenahme-zeitpunkt	N-Stufe / N-Aufwand-menge	SCHLAG 1 (Sommerweizen, Ölrettich, Silomais)										SCHLAG 2 (Silomais, Sommerweizen)									
		GP A		GP B		GP C		MD		Mittelwert		GP A		GP B		GP C		MD		Mittelwert	
		N_{ges} [mg 100 g ⁻¹]	N_{hwl} [mg 100 g ⁻¹]	N_{ges} [mg 100 g ⁻¹]	N_{hwl} [mg 100 g ⁻¹]	N_{ges} [mg 100 g ⁻¹]	N_{hwl} [mg 100 g ⁻¹]	N_{ges} [mg 100 g ⁻¹]	N_{hwl} [mg 100 g ⁻¹]	N_{ges} [mg 100 g ⁻¹]	N_{hwl} [mg 100 g ⁻¹]	N_{ges} [mg 100 g ⁻¹]	N_{hwl} [mg 100 g ⁻¹]	N_{ges} [mg 100 g ⁻¹]	N_{hwl} [mg 100 g ⁻¹]	N_{ges} [mg 100 g ⁻¹]	N_{hwl} [mg 100 g ⁻¹]	N_{ges} [mg 100 g ⁻¹]	N_{hwl} [mg 100 g ⁻¹]	N_{ges} [mg 100 g ⁻¹]	N_{hwl} [mg 100 g ⁻¹]
Frühjahr 2006	Schlag gesamt	Ausgangswerte: $N_{\text{ges}} = 71 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ $N_{\text{hwl}} = 7 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$										Ausgangswerte: $N_{\text{ges}} = 68 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ $N_{\text{hwl}} = 7 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$									
Herbst 2006	0 kg ha ⁻¹ N	96 ^a	6 ^a	98 ^a	7 ^a	96 ^a	6 ^a	96 ^a	6 ^a	96 ^A	6 ^A	80 ^a	5 ^a	82 ^a	5 ^a	76 ^a	5 ^a	78 ^a	4 ^a	79 ^A	4 ^A
	N-Stufe 1*	94 ^a	6 ^a	101 ^a	6 ^a	97 ^a	7 ^a	97 ^a	6 ^a	98 ^A	6 ^A	77 ^a	5 ^a	77 ^a	5 ^a	84 ^a	5 ^{ab}	72 ^a	4 ^a	78 ^A	5 ^A
	N-Stufe 2*	96 ^a	6 ^a	97 ^a	6 ^a	96 ^a	6 ^a	94 ^a	7 ^a	96 ^A	6 ^A	80 ^a	5 ^a	78 ^a	5 ^a	89 ^a	5 ^b	75 ^a	4 ^a	81 ^A	5 ^A
	N-Stufe 3*	99 ^a	6 ^a	97 ^a	6 ^a	97 ^a	7 ^a	94 ^a	7 ^a	97 ^A	7 ^A	83 ^a	5 ^a	81 ^a	5 ^a	82 ^a	5 ^{ab}	75 ^a	4 ^a	80 ^A	5 ^A
	Mittelwert	96 ^A	6 ^A	99 ^A	6 ^A	96 ^A	7 ^A	95 ^A	7 ^A	97	6	80 ^A	5 ^B	80 ^A	5 ^B	83 ^A	5 ^B	75 ^A	4 ^A	80	5
Frühjahr 2007	0 kg ha ⁻¹ N	80 ^a	4 ^a	81 ^a	4 ^a	79 ^a	5 ^a	81 ^a	6 ^a	80 ^A	5 ^A	80 ^a	6 ^a	79 ^a	5 ^a	81 ^a	6 ^a	78 ^a	5 ^a	80 ^A	5 ^A
	50 kg ha ⁻¹ N	79 ^a	4 ^a	82 ^a	5 ^a	78 ^a	6 ^a	82 ^a	5 ^a	80 ^A	5 ^A	82 ^a	6 ^a	80 ^a	6 ^a	79 ^a	5 ^a	79 ^a	5 ^a	80 ^A	5 ^A
	100 kg ha ⁻¹ N	77 ^a	5 ^a	78 ^a	4 ^a	79 ^a	5 ^a	77 ^a	5 ^a	78 ^A	5 ^A	82 ^a	6 ^a	83 ^a	6 ^a	79 ^a	6 ^a	80 ^a	5 ^a	81 ^A	6 ^A
	150 kg ha ⁻¹ N	79 ^a	5 ^a	80 ^a	4 ^a	78 ^a	5 ^a	78 ^a	6 ^a	79 ^A	5 ^A	82 ^a	7 ^a	83 ^a	6 ^a	80 ^a	6 ^a	76 ^a	5 ^a	80 ^A	6 ^A
	Mittelwert	79 ^A	4 ^{AB}	80 ^A	4 ^A	79 ^A	5 ^{AB}	79 ^A	5 ^B	79	5	81 ^A	6 ^B	81 ^A	6 ^{AB}	80 ^A	6 ^{AB}	78 ^A	5 ^A	80	6
Herbst 2007	0 kg ha ⁻¹ N	73 ^a	3 ^a	72 ^a	3 ^a	72 ^a	3 ^a	69 ^a	3 ^a	71 ^A	3 ^A	74 ^a	3 ^a	72 ^a	2 ^a	74 ^a	2 ^a	73 ^a	2 ^a	73 ^A	2 ^A
	50 kg ha ⁻¹ N	72 ^a	3 ^a	73 ^a	3 ^a	69 ^a	3 ^a	67 ^a	3 ^a	70 ^A	3 ^A	87 ^a	2 ^a	72 ^a	3 ^a	73 ^a	2 ^a	75 ^a	3 ^a	77 ^{AB}	3 ^A
	100 kg ha ⁻¹ N	73 ^a	3 ^a	72 ^a	3 ^a	72 ^a	3 ^a	71 ^a	3 ^a	72 ^A	3 ^A	83 ^a	3 ^a	80 ^a	3 ^a	77 ^a	3 ^a	78 ^a	2 ^a	80 ^B	3 ^A
	150 kg ha ⁻¹ N	75 ^a	3 ^a	75 ^a	3 ^a	71 ^a	4 ^a	68 ^a	3 ^a	72 ^A	3 ^A	79 ^a	3 ^a	77 ^a	2 ^a	78 ^a	3 ^a	73 ^a	2 ^a	77 ^{AB}	2 ^A
	Mittelwert	73 ^A	3 ^A	73 ^A	3 ^A	71 ^A	3 ^A	68 ^A	3 ^A	71	3	81 ^B	2 ^A	76 ^A	3 ^A	76 ^{AB}	3 ^A	75 ^A	2 ^A	77	3

* die fett markierten Werte entsprechen einer N-Aufwandmenge von ca. 150 kg ha⁻¹ N

Tabelle 7-4: Gehalte an mineralischem Stickstoff (N_{\min}) in 0-30 und 30-60 cm Bodentiefe in den Parzellenfeldversuchen in Abhängigkeit der Düngerart, der Aufwandmenge und des Probenahmezeitpunktes

Vergleiche wurden für Kombinationsmittelwerte (pro Düngerart Vergleich der Aufwandmengen) durchgeführt (kleine Buchstaben), im Fall nicht signifikanter Wechselwirkungen wurden außerdem die Hauptmittelwerte der Düngerarten und Aufwandmengen verglichen (große Buchstaben); Mittelwerte mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant, Auswertung für Schlag 2, Herbst 2006 für N_{\min} 0-30 cm mittels Rangvergleich 5 %, ansonsten Tukey-Test mit $\alpha = 0,05$

Probenahme-zeitpunkt	N-Stufe / N-Aufwand-menge	SCHLAG 1 (Sommerweizen, Ölrettich, Silomais)										SCHLAG 2 (Silomais, Sommerweizen)																	
		GP A				GP B				GP C		MD		Mittelwert		GP A				GP B				GP C		MD		Mittelwert	
		N _{min} 0-30 cm	N _{min} 30-60 cm	N _{min} 0-30 cm	N _{min} 0-60 cm	N _{min} 0-30 cm	N _{min} 30-60 cm	N _{min} 0-30 cm	N _{min} 30-60 cm	N _{min} 0-30 cm	N _{min} 30-60 cm	N _{min} 0-30 cm	N _{min} 30-60 cm	N _{min} 0-30 cm	N _{min} 30-60 cm	N _{min} 0-30 cm	N _{min} 30-60 cm	N _{min} 0-30 cm	N _{min} 30-60 cm	N _{min} 0-30 cm	N _{min} 30-60 cm	N _{min} 0-30 cm	N _{min} 30-60 cm	N _{min} 0-30 cm	N _{min} 30-60 cm	N _{min} 0-30 cm	N _{min} 30-60 cm	N _{min} 0-30 cm	N _{min} 30-60 cm
		[mg 100 g ⁻¹] [(kg ha ⁻¹)]										[mg 100 g ⁻¹] [(kg ha ⁻¹)]																	
Frühjahr 2006	Schlag gesamt	Ausgangswerte: N _{min} , 0-30 cm = 0,27 mg 100 g ⁻¹ (12 kg ha ⁻¹) N _{min} , 30-60 cm = 0,17 mg 100 g ⁻¹ (8 kg ha ⁻¹)												Ausgangswerte: N _{min} , 0-30 cm = 0,31 mg 100 g ⁻¹ (14 kg ha ⁻¹) N _{min} , 30-60 cm = 0,10 mg 100 g ⁻¹ (5 kg ha ⁻¹)															
Herbst 2006	0 kg ha ⁻¹ N	0,50 ^a (22)	0,29 ^a (13)	0,64 ^a (29)	0,15 ^a (7)	0,53 ^a (24)	0,21 ^a (9)	0,53 ^a (24)	0,27 ^a (12)	0,55 (25)	0,23 ^A (10)	0,19 ^a (8)	0,06 ^a (3)	0,18 ^a (8)	0,06 ^a (3)	0,19 ^a (9)	0,07 ^a (3)	0,19 ^a (9)	0,08 ^a (3)	0,19 ^A (8)	0,07 ^A (3)								
	N-Stufe 1*	0,45 ^a (20)	0,35 ^a (16)	0,60 ^a (27)	0,22 ^a (10)	0,68 ^{ab} (31)	0,30 ^a (14)	0,63 ^a (28)	0,26 ^a (12)	0,59 (27)	0,29 ^A (13)	0,20 ^a (9)	0,11 ^a (5)	0,20 ^a (9)	0,08 ^a (4)	0,18 ^a (8)	0,11 ^a (5)	0,19 ^a (9)	0,05 ^a (2)	0,19 ^A (9)	0,09 ^A (4)								
	N-Stufe 2*	0,70 ^a (32)	0,33 ^a (15)	0,58 ^a (26)	0,32 ^a (15)	0,62 ^{ab} (28)	0,37 ^a (17)	0,74 ^a (33)	0,28 ^a (12)	0,66 (30)	0,32 ^A (15)	0,20 ^a (9)	0,06 ^a (3)	0,23 ^a (10)	0,06 ^a (3)	0,20 ^a (9)	0,09 ^a (4)	0,32 ^a (14)	0,08 ^a (4)	0,24 ^{AB} (11)	0,07 ^A (3)								
	N-Stufe 3*	0,59 ^a (27)	0,39 ^a (17)	0,66 ^a (30)	0,29 ^a (13)	0,92 ^b (41)	0,30 ^a (14)	0,85 ^a (38)	0,30 ^a (13)	0,76 (34)	0,32 ^A (14)	0,20 ^a (9)	0,09 ^a (4)	0,23 ^a (10)	0,07 ^a (3)	0,22 ^a (10)	0,07 ^a (3)	0,46 ^a (21)	0,15 ^a (7)	0,28 ^B (13)	0,09 ^A (4)								
	Mittelwert	0,56 (25)	0,34 ^A (15)	0,62 (28)	0,25 ^A (11)	0,69 (31)	0,30 ^A (13)	0,69 (31)	0,28 ^A (12)	0,64 (29)	0,29 (13)	0,20 ^A (9)	0,08 ^A (4)	0,21 ^A (9)	0,07 ^A (3)	0,20 ^A (9)	0,08 ^A (4)	0,29 ^A (13)	0,09 ^A (4)	0,22 (10)	0,08 (4)								
Frühjahr 2007	0 kg ha ⁻¹ N	0,48 ^a (22)	0,25 ^a (11)	0,51 ^a (23)	0,31 ^a (14)	0,53 ^a (24)	0,32 ^a (15)	0,48 ^a (22)	0,31 ^a (14)	0,50 ^A (23)	0,30 (14)	0,25 ^a (11)	0,23 ^a (10)	0,23 ^a (10)	0,20 ^a (9)	0,26 ^a (12)	0,16 ^a (7)	0,28 ^a (12)	0,22 ^a (10)	0,25 ^A (11)	0,20 ^A (9)								
	50 kg ha ⁻¹ N	0,48 ^a (22)	0,28 ^{ab} (13)	0,48 ^a (22)	0,26 ^a (12)	0,58 ^a (26)	0,35 ^a (16)	0,52 ^a (23)	0,29 ^a (13)	0,52 ^A (23)	0,29 (13)	0,25 ^a (11)	0,21 ^a (10)	0,31 ^a (14)	0,22 ^a (10)	0,28 ^a (13)	0,14 ^a (7)	0,28 ^a (12)	0,19 ^a (9)	0,28 ^A (13)	0,19 ^A (9)								
	100 kg ha ⁻¹ N	0,56 ^a (25)	0,34 ^{ab} (15)	0,50 ^a (23)	0,28 ^a (13)	0,52 ^a (23)	0,32 ^a (15)	0,55 ^a (25)	0,28 ^a (13)	0,53 ^A (24)	0,31 (14)	0,22 ^a (10)	0,20 ^a (9)	0,32 ^a (14)	0,21 ^a (9)	0,29 ^a (13)	0,18 ^a (8)	0,30 ^a (13)	0,22 ^a (10)	0,28 ^A (13)	0,20 ^A (9)								
	150 kg ha ⁻¹ N	0,49 ^a (22)	0,37 ^b (17)	0,53 ^a (24)	0,33 ^a (15)	0,55 ^a (25)	0,29 ^a (13)	0,54 ^a (24)	0,30 ^a (14)	0,53 ^A (24)	0,32 (15)	0,25 ^a (11)	0,21 ^a (9)	0,19 ^a (9)	0,17 ^a (8)	0,22 ^a (10)	0,18 ^a (8)	0,29 ^a (13)	0,19 ^a (9)	0,24 ^A (11)	0,19 ^A (9)								
	Mittelwert	0,50 ^A (23)	0,31 (14)	0,51 ^A (23)	0,29 (13)	0,54 ^A (25)	0,32 (14)	0,52 ^A (24)	0,29 (13)	0,52 (23)	0,31 (14)	0,24 ^A (11)	0,21 ^A (10)	0,26 ^A (12)	0,20 ^A (9)	0,26 ^A (12)	0,17 ^A (8)	0,29 ^A (13)	0,21 ^A (9)	0,26 (12)	0,20 (9)								
Herbst 2007	0 kg ha ⁻¹ N	0,27 ^a (12)	0,10 ^a (5)	0,27 ^a (12)	0,11 ^a (5)	0,18 ^a (8)	0,09 ^a (4)	0,21 ^a (10)	0,15 ^a (7)	0,24 ^A (11)	0,11 ^A (5)	0,40 ^a (18)	0,24 ^a (11)	0,42 ^a (19)	0,27 ^a (12)	0,40 ^a (18)	0,22 ^a (10)	0,38 ^a (17)	0,27 ^a (12)	0,40 ^A (18)	0,25 ^A (11)								
	50 kg ha ⁻¹ N	0,25 ^a (11)	0,08 ^a (3)	0,23 ^a (10)	0,09 ^a (4)	0,19 ^a (8)	0,08 ^a (4)	0,22 ^a (10)	0,11 ^a (5)	0,22 ^A (10)	0,09 ^A (4)	0,49 ^a (22)	0,22 ^a (10)	0,47 ^a (21)	0,25 ^a (11)	0,41 ^a (19)	0,23 ^a (11)	0,41 ^a (19)	0,25 ^a (11)	0,45 ^A (20)	0,24 ^A (11)								
	100 kg ha ⁻¹ N	0,21 ^a (10)	0,12 ^a (5)	0,21 ^a (9)	0,12 ^a (5)	0,18 ^a (8)	0,07 ^a (3)	0,22 ^a (10)	0,10 ^a (4)	0,21 ^A (9)	0,10 ^A (5)	0,46 ^a (21)	0,22 ^a (10)	0,39 ^a (17)	0,27 ^a (12)	0,43 ^a (19)	0,19 ^a (9)	0,40 ^a (18)	0,28 ^a (13)	0,42 ^A (19)	0,24 ^A (11)								
	150 kg ha ⁻¹ N	0,25 ^a (11)	0,09 ^a (4)	0,23 ^a (10)	0,14 ^a (6)	0,24 ^a (11)	0,13 ^a (6)	0,23 ^a (10)	0,16 ^a (7)	0,24 ^A (11)	0,13 ^A (6)	0,48 ^a (21)	0,23 ^a (10)	0,49 ^a (22)	0,19 ^a (9)	0,46 ^a (21)	0,22 ^a (10)	0,41 ^a (19)	0,28 ^a (12)	0,46 ^A (21)	0,23 ^A (10)								
	Mittelwert	0,25 ^A (11)	0,10 ^A (4)	0,23 ^A (11)	0,12 ^A (5)	0,20 ^A (9)	0,09 ^A (4)	0,22 ^A (10)	0,13 ^A (6)	0,22 (10)	0,11 (5)	0,46 ^A (21)	0,23 ^A (10)	0,44 ^A (20)	0,25 ^A (11)	0,43 ^A (19)	0,22 ^A (10)	0,40 ^A (18)	0,27 ^A (12)	0,43 (19)	0,24 (11)								

* die fett markierten Werte entsprechen einer N-Aufwandmenge von ca. 150 kg ha⁻¹ N

Tabelle 7-5: Lösliche Phosphor- (P_{DL}) und Kaliumgehalte (K_{DL}) des Bodens in den Parzellenfeldversuchen in Abhängigkeit der Düngerart, der Aufwandmenge und des Probenahmezeitpunktes

Vergleiche wurden für Kombinationsmittelwerte (pro Düngerart Vergleich der Aufwandmengen) durchgeführt (kleine Buchstaben), im Fall nicht signifikanter Wechselwirkungen wurden außerdem die Hauptmittelwerte der Düngerarten und Aufwandmengen verglichen (große Buchstaben); Mittelwerte mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant, Auswertung für Schlag 2, Herbst 2006 für P sowie im Herbst 2007 für K mittels Rangvergleich 5 %, ansonsten Tukey-Test mit $\alpha = 0,05$

Probenahme-zeitpunkt	N-Stufe / N-Aufwandmenge	SCHLAG 1 (Sommerweizen, Ölrettich, Silomais)										SCHLAG 2 (Silomais, Sommerweizen)									
		GP A		GP B		GP C		MD		Mittelwert		GP A		GP B		GP C		MD		Mittelwert	
		P_{DL} [mg 100 g ⁻¹]	K_{DL} [mg 100 g ⁻¹]	P_{DL} [mg 100 g ⁻¹]	K_{DL} [mg 100 g ⁻¹]	P_{DL} [mg 100 g ⁻¹]	K_{DL} [mg 100 g ⁻¹]	P_{DL} [mg 100 g ⁻¹]	K_{DL} [mg 100 g ⁻¹]	P_{DL} [mg 100 g ⁻¹]	K_{DL} [mg 100 g ⁻¹]	P_{DL} [mg 100 g ⁻¹]	K_{DL} [mg 100 g ⁻¹]	P_{DL} [mg 100 g ⁻¹]	K_{DL} [mg 100 g ⁻¹]	P_{DL} [mg 100 g ⁻¹]	K_{DL} [mg 100 g ⁻¹]	P_{DL} [mg 100 g ⁻¹]	K_{DL} [mg 100 g ⁻¹]	P_{DL} [mg 100 g ⁻¹]	K_{DL} [mg 100 g ⁻¹]
Frühjahr 2006	Schlag gesamt	Ausgangswerte: $P_{DL} = 39 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ $K_{DL} = 27 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$										Ausgangswerte: $P_{DL} = 34 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ $K_{DL} = 30 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$									
Herbst 2006	0 kg ha ⁻¹ N	36 ^a	26 ^a	37 ^a	26 ^a	35 ^a	27 ^a	38 ^a	26 ^a	36	26	34 ^a	25 ^a	34 ^a	26 ^a	33 ^a	26 ^a	32 ^a	25 ^a	33 ^A	25 ^A
	N-Stufe 1*	36 ^a	26 ^a	34 ^a	26 ^a	37 ^a	28 ^{ab}	38 ^a	27 ^{ab}	36	27	36 ^a	26 ^a	36 ^a	26 ^a	33 ^a	27 ^a	35 ^a	28 ^a	35 ^A	27 ^A
	N-Stufe 2*	35 ^a	27 ^a	36 ^a	29 ^a	37 ^a	28 ^{ab}	43 ^b	30 ^{bc}	38	28	35 ^a	27 ^a	35 ^a	26 ^a	35 ^a	28 ^{ab}	37 ^{ab}	28 ^a	35 ^A	27 ^A
	N-Stufe 3*	36 ^a	27 ^a	36 ^a	27 ^a	37 ^a	30 ^b	45 ^b	32 ^c	39	29	36 ^a	28 ^a	35 ^a	29 ^a	35 ^a	33 ^b	39 ^b	28 ^a	36 ^A	30 ^B
	Mittelwert	36	26	36	27	37	29	41	29	37	28	35 ^A	26 ^A	35 ^A	27 ^A	34 ^A	29 ^B	36 ^A	27 ^{AB}	35	27
Frühjahr 2007	0 kg ha ⁻¹ N	35 ^a	25 ^a	35 ^a	24 ^a	35 ^a	25 ^a	36 ^a	26 ^a	35 ^A	25 ^A	34 ^a	25 ^a	35 ^a	25 ^a	34 ^a	26 ^a	33 ^a	26 ^a	34 ^A	26 ^A
	50 kg ha ⁻¹ N	35 ^a	25 ^a	35 ^a	24 ^a	35 ^a	25 ^a	37 ^a	26 ^a	35 ^{AB}	25 ^{AB}	36 ^a	25 ^a	34 ^a	25 ^a	33 ^a	28 ^a	34 ^a	27 ^a	34 ^A	26 ^A
	100 kg ha ⁻¹ N	35 ^a	25 ^a	35 ^a	26 ^a	36 ^a	26 ^a	37 ^a	26 ^a	36 ^{AB}	26 ^{AB}	35 ^a	26 ^a	34 ^a	25 ^a	34 ^a	27 ^a	34 ^a	28 ^a	34 ^A	26 ^A
	150 kg ha ⁻¹ N	36 ^a	25 ^a	35 ^a	25 ^a	35 ^a	27 ^a	39 ^a	28 ^a	36 ^B	26 ^B	35 ^a	26 ^a	34 ^a	26 ^a	34 ^a	27 ^a	36 ^a	27 ^a	35 ^A	27 ^A
	Mittelwert	35 ^A	25 ^A	35 ^A	25 ^A	35 ^A	26 ^A	37 ^A	26 ^A	36	25	35 ^A	26 ^A	34 ^A	26 ^A	34 ^A	27 ^A	34 ^A	27 ^A	34	26
Herbst 2007	0 kg ha ⁻¹ N	35 ^a	22 ^a	32 ^a	20 ^a	34 ^a	21 ^a	34 ^a	22 ^a	34 ^A	21 ^A	32 ^a	23 ^a	32 ^a	22 ^a	32 ^a	23 ^a	30 ^a	23 ^{ab}	32 ^A	23 ^A
	50 kg ha ⁻¹ N	33 ^a	20 ^a	33 ^a	22 ^a	34 ^a	22 ^a	36 ^{ab}	23 ^{ab}	34 ^{AB}	22 ^A	35 ^a	24 ^a	34 ^a	26 ^{ab}	32 ^a	25 ^{ab}	32 ^a	24 ^a	33 ^A	25 ^B
	100 kg ha ⁻¹ N	34 ^a	22 ^a	35 ^a	22 ^a	35 ^a	23 ^a	38 ^{ab}	24 ^{ab}	35 ^{BC}	23 ^{AB}	33 ^a	24 ^a	33 ^a	25 ^b	33 ^a	25 ^{ab}	32 ^a	27 ^b	33 ^A	25 ^B
	150 kg ha ⁻¹ N	35 ^a	23 ^a	34 ^a	22 ^a	34 ^a	24 ^a	39 ^b	27 ^b	36 ^C	24 ^B	34 ^a	24 ^a	33 ^a	25 ^b	31 ^a	27 ^b	33 ^a	26 ^{ab}	33 ^A	25 ^B
	Mittelwert	34 ^{AB}	22 ^A	34 ^A	22 ^A	34 ^{AB}	22 ^A	37 ^B	24 ^A	35	22	34 ^A	24 ^A	33 ^A	25 ^{AB}	32 ^A	25 ^B	32 ^A	25 ^B	33	25

* die fett markierten Werte entsprechen einer N-Aufwandmenge von ca. 150 kg ha⁻¹ N

Tabelle 7-6: pH-Werte des Bodens in den Parzellenfeldversuchen in Abhängigkeit der Düngerart, der Aufwandmenge und des Probenahmezeitpunktes

Vergleiche wurden für Kombinationsmittelwerte (pro Düngerart Vergleich der Aufwandmengen) durchgeführt (kleine Buchstaben), im Fall nicht signifikanter Wechselwirkungen wurden außerdem die Hauptmittelwerte der Düngerarten und Aufwandmengen verglichen (große Buchstaben); Mittelwerte mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant, Auswertung für Schlag 1, Herbst 2006 sowie Frühjahr und Herbst 2007 mittels Rangvergleich bei 5 %, ansonsten Tukey-Test mit $\alpha = 0,05$

Probenahme-zeitpunkt	N-Stufe / N-Aufwand-menge	SCHLAG 1 (Sommerweizen, Ölrettich, Silomais)					SCHLAG 2 (Silomais, Sommerweizen)				
		GP A	GP B	GP C	MD	MW	GP A	GP B	GP C	MD	MW
		pH-Wert					pH-Wert				
Frühjahr 2006	Schlag gesamt	Ausgangswert: 6,8					Ausgangswert: 6,8				
Herbst 2006	N-Stufe 1*	7,3 ^a	7,1 ^a	7,2 ^a	7,2 ^a	7,2 ^A	7,0 ^a	7,0 ^a	7,0 ^a	6,9 ^a	7,0 ^A
		7,2 ^a	7,1 ^a	7,2 ^a	7,2 ^a	7,2 ^A	7,1 ^a	7,0 ^a	7,0 ^a	6,7 ^a	6,9 ^A
	N-Stufe 2*	7,2 ^a	7,2 ^a	7,2 ^a	7,1 ^a	7,2 ^A	7,0 ^a	7,0 ^a	7,0 ^a	6,8 ^a	7,0 ^A
	N-Stufe 3*	7,2 ^a	7,2 ^a	7,2 ^a	7,1 ^a	7,2 ^A	7,1 ^a	7,0 ^a	6,9 ^a	6,9 ^a	7,0 ^A
	Mittelwert	7,2 ^B	7,1 ^{AB}	7,2 ^B	7,2 ^A	7,2	7,0 ^A	7,0 ^A	7,0 ^A	6,8 ^A	7,0
Frühjahr 2007	0 kg ha ⁻¹ N	7,2 ^{ab}	7,0 ^a	7,2 ^a	7,2 ^a	7,1 ^A	6,9 ^a	7,0 ^a	7,0 ^a	6,9 ^a	7,0 ^A
	50 kg ha ⁻¹ N	7,1 ^{ab}	7,0 ^a	7,2 ^a	7,1 ^a	7,1 ^A	7,1 ^a	7,0 ^a	6,9 ^a	6,9 ^a	7,0 ^A
	100 kg ha ⁻¹ N	7,2 ^b	7,1 ^a	7,1 ^a	7,1 ^a	7,1 ^A	7,0 ^a	7,0 ^a	6,9 ^a	6,9 ^a	7,0 ^A
	150 kg ha ⁻¹ N	7,1 ^a	7,1 ^a	7,1 ^a	7,1 ^a	7,1 ^A	7,0 ^a	7,0 ^a	6,9 ^a	6,9 ^a	6,9 ^A
	Mittelwert	7,1 ^A	7,1 ^A	7,1 ^A	7,1 ^A	7,1	7,0 ^A	7,0 ^A	6,9 ^A	6,9 ^A	7,0
Herbst 2007	0 kg ha ⁻¹ N	7,4 ^a	7,3 ^a	7,4 ^b	7,4 ^b	7,4 ^A	7,0 ^a	7,0 ^a	7,0 ^a	7,0 ^a	7,0 ^A
	50 kg ha ⁻¹ N	7,4 ^a	7,3 ^a	7,3 ^a	7,4 ^{ab}	7,3 ^A	7,1 ^a	7,0 ^a	7,0 ^a	7,0 ^a	7,0 ^A
	100 kg ha ⁻¹ N	7,4 ^a	7,3 ^a	7,4 ^{ab}	7,3 ^{ab}	7,4 ^A	7,0 ^a	7,0 ^a	7,1 ^a	7,0 ^a	7,0 ^A
	150 kg ha ⁻¹ N	7,4 ^b	7,4 ^a	7,4 ^{ab}	7,3 ^a	7,4 ^A	7,2 ^a	7,0 ^a	7,0 ^a	6,9 ^a	7,0 ^A
	Mittelwert	7,4 ^A	7,3 ^A	7,4 ^A	7,4 ^A	7,4	7,1 ^A	7,0 ^A	7,0 ^A	7,0 ^A	7,0

* die fett markierten Werte entsprechen einer N-Aufwandmenge von ca. 150 kg ha⁻¹ N

Anhang

149

Tabelle 7-8: Nährstoffbilanz für die Nährstoffe N, P und K im Jahr 2007 für Sommerweizen

Dünger	Aufwandmenge [kg ha ⁻¹ N]	Weizenstroh						Weizenkorn						Gesamt							
		Ertrag [dt ha ⁻¹ TM]	Gehalt [g kg ⁻¹]			Entzug [kg ha ⁻¹]			Ertrag [dt ha ⁻¹ TM]	Gehalt [g kg ⁻¹]			Entzug [kg ha ⁻¹]			Aus- bringung [kg ha ⁻¹]			Bilanz [kg ha ⁻¹]		
			N	P	K	N	P	K		N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
Kontrolle	0	13,1	7,1	2,1	13,4	9,3	2,8	17,6	13,2	23,4	2,8	4,3	30,9	3,7	5,7	0,0	0,0	0,0	-40,2	-6,5	-23,4
GP A	50	14,0	6,6	2,2	13,4	9,2	3,1	18,8	14,5	23,6	3,1	4,2	34,2	4,5	6,1	49,7	9,6	37,4	+6,3	+2,0	+12,5
	100	20,2	6,7	2,1	12,8	13,5	4,2	25,9	17,2	23,4	2,7	4,3	40,3	4,6	7,4	99,5	19,1	74,7	+45,7	+10,3	+41,4
	150	20,0	6,8	2,1	14,1	13,6	4,2	28,2	18,7	22,7	2,9	4,3	42,5	5,4	8,0	149,2	28,7	112,0	+93,1	+19,1	+75,8
GP B	50	16,1	6,9	2,1	13,2	11,1	3,4	21,3	14,1	23,6	3,1	4,3	33,3	4,4	6,1	50,1	8,4	54,9	+5,7	+0,6	+27,5
	100	17,4	6,5	2,1	13,9	11,3	3,7	24,2	16,5	23,2	2,8	4,3	38,3	4,6	7,1	100,2	16,9	109,7	+50,6	+8,6	+78,4
	150	19,5	6,4	1,9	13,4	12,5	3,7	26,1	18,3	23,3	3,0	4,3	42,6	5,5	7,9	150,4	25,3	164,6	+95,3	+16,1	+130,6
GP C	50	13,7	6,8	2,0	12,5	9,3	2,7	17,1	14,7	23,3	2,8	4,3	34,3	4,1	6,3	47,3	9,8	55,9	+3,7	+3,0	+32,5
	100	17,8	7,1	2,1	12,9	12,6	3,7	23,0	17,1	23,7	2,7	4,2	40,5	4,6	7,2	94,6	19,6	111,8	+41,5	+11,3	+81,6
	150	19,8	6,7	1,8	13,0	13,3	3,6	25,7	19,4	23,2	2,8	4,3	45,0	5,4	8,3	141,9	29,4	167,6	+83,6	+20,4	+133,6
MD	50	20,3	6,6	2,0	14,2	13,4	4,1	28,8	15,2	23,8	2,6	4,4	36,2	4,0	6,7	50,0	12,5	49,4	+0,4	+4,4	+13,9
	100	25,1	7,0	1,8	15,2	17,6	4,5	38,2	21,4	24,9	2,7	4,4	53,3	5,8	9,4	100,0	24,9	98,8	+29,1	+14,6	+51,2
	150	29,3	8,6	2,1	17,4	25,2	6,2	51,0	22,5	27,6	2,8	4,5	62,1	6,3	10,1	150,0	37,4	148,2	+62,7	+24,9	+87,1

Tabelle 7-9: Nährstoffbilanz für die Nährstoffe N, P und K im Jahr 2006 für Silomais

Dünger	Aufwand- menge [kg ha ⁻¹ N]	Ertrag [dt ha ⁻¹ TM]	Gehalt			Entzug			Ausbringung			Bilanz		
			N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
			[g kg ⁻¹]			[kg ha ⁻¹]			[kg ha ⁻¹]			[kg ha ⁻¹]		
Kontrolle	0	104,9	7,8	2,3	10,8	81,8	24,1	113,3	0,0	0,0	0,0	-81,8	-24,1	-113,3
GP A	168	139,8	8,5	2,1	11,3	118,8	29,4	158,0	167,6	25,6	100,5	+48,8	-3,8	-57,5
GP B	129	121,9	7,6	2,0	10,1	92,6	24,4	123,1	129,3	20,5	141,9	+36,7	-3,9	+18,8
GP C	124	123,8	7,8	2,3	11,7	96,6	28,5	144,9	124,4	20,3	95,5	+27,8	-8,2	-49,4
MD	150	146,9	11,6	2,0	13,5	170,4	29,4	198,3	150,0	232,5	202,5	-20,4	+203,1	+4,2

Tabelle 7-10: Nährstoffbilanz für die Nährstoffe N, P und K im Jahr 2007 für Silomais

Dünger	Aufwand- menge [kg ha ⁻¹ N]	Ertrag [dt ha ⁻¹ TM]	Gehalt			Entzug			Ausbringung			Bilanz		
			N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
			[g kg ⁻¹]			[kg ha ⁻¹]			[kg ha ⁻¹]			[kg ha ⁻¹]		
Kontrolle	0	137,4	8,8	2,1	11,0	120,9	28,9	151,1	0,0	0,0	0,0	-120,9	-28,9	-151,1
GP A	50	154,8	9,0	2,2	10,6	139,3	34,1	164,1	49,7	9,6	37,4	-89,6	-24,5	-126,7
	100	166,1	8,3	2,2	11,6	137,9	36,5	192,7	99,5	19,1	74,7	-38,4	-17,4	-118,0
	150	175,8	8,2	2,4	11,3	144,2	42,2	198,7	149,2	28,7	112,0	+5,0	-13,5	-86,7
GP B	50	146,0	10,6	1,9	10,2	154,8	27,7	148,9	50,1	8,4	54,9	-104,7	-19,3	-94,0
	100	144,5	9,6	1,8	10,7	138,7	26,0	154,6	100,2	16,9	109,7	-38,5	-9,1	-44,9
	150	152,6	9,8	2,0	11,3	149,6	30,5	172,4	150,4	25,3	164,6	+0,8	-5,2	-7,8
GP C	50	150,8	8,6	1,9	11,1	129,7	28,7	167,4	47,3	9,8	55,9	-82,4	-18,9	-111,5
	100	165,8	9,3	2,1	10,6	154,2	34,8	175,8	94,6	19,6	111,8	-59,6	-15,2	-64,0
	150	166,1	8,6	2,2	12,2	142,9	36,5	202,6	141,9	29,4	167,6	-1,0	-7,1	-35,0
MD	50	182,5	9,2	2,0	11,6	167,9	36,5	211,7	50,0	12,5	49,4	-117,9	-24,0	-162,3
	100	216,4	9,4	1,9	10,6	203,4	41,1	229,4	100,0	24,9	98,8	-103,4	-16,2	-130,6
	150	215,9	9,4	1,9	10,2	203,0	41,0	220,2	150,0	37,4	148,2	-53,0	-3,6	-72,0

DANKSAGUNGEN

Prof. Dr. Dr. h.c. Frank Ellmer möchte ich für die sehr gute Betreuung und die immer zielgerichteten Ratschläge, Anregungen und Diskussionen sehr herzlich danken. Für die sehr gute Zusammenarbeit im Projekt möchte ich mich bei Karen Sensel vom Institut für Agrar- und Stadtökologische Projekte an der Humboldt-Universität zu Berlin (IASP) bedanken.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, die zum Gelingen der Versuche beigetragen haben, möchte ich für die Unterstützung danken. Mein besonderer Dank gilt dabei Heiko Vogel, der mir bei allen Versuchsanlagen, Probenahmen und Ernten geholfen hat und nie Mühen gescheut hat. Ebenfalls danke ich den Mitarbeitern der Lehr- und Forschungsstation der Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät (LGF) in Berlin-Dahlem für die Hilfe bei der Feldversuchsbetreuung sowie den Mitarbeitern des Gemeinschaftslabors Analytik der LGF für die Durchführung der chemischen Analysen. Frau Dr. Bärbel Kroschewski gilt mein Dank für die statistische Beratung bei der Versuchsauswertung.

Den beteiligten Landwirten möchte ich sehr für die gute Kooperation, das Bereitstellen der Gärprodukte und die Möglichkeit, die Praxisversuche auf ihren Feldern durchzuführen, danken. Herrn Prof. Dr. Jürgen Augustin, Dr. Stephan Wirth sowie Merten Minke vom Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V. sei für die gute Zusammenarbeit bei der Durchführung des Modell-Bodenatmungsversuchs gedankt. Bedanken möchte ich mich auch bei Frau Dr. Stefanie Krück für die kompetente Beratung sowie bei Paula Gruner mit ihrem fleißigen Team für die Auszählungen der Bodenproben und weiteren Arbeiten im Rahmen der Regenwurmuntersuchungen.

Mein besonderer Dank gilt Ludger Schrempf, der mir mit vielen Ratschlägen und fachlichen Diskussionen oft geholfen hat, die Dinge auch aus anderen Blickwinkeln zu betrachten. Ganz herzlich möchte ich auch meiner Familie danken, die mich immer unterstützt und motiviert hat.

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des Projektes „Pflanzenbauliche Verwertung von Gärückständen aus Biogasanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Inputsubstrats Energiepflanzen“ angefertigt, welches von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) mit Mitteln des Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) finanziert wurde.

ERKLÄRUNG

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel genutzt habe. Alle wörtlich oder inhaltlich übernommenen Stellen habe ich als solche gekennzeichnet.

Ich versichere außerdem, dass ich die vorliegende Dissertation nur in diesem und keinem anderen Promotionsverfahren eingereicht habe und dass diesem Promotionsverfahren keine endgültig gescheiterten Promotionsverfahren vorausgegangen sind.